

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ
KATEDRA METALURGIE A SLÉVARENSTVÍ



Výroba odlitků a studium tepelných vlastností litých kovových pěn

**PRODUCTION OF CASTINGS AND STUDY OF
THERMAL PROPERTIES OF CAST METAL FOAMS**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE: Bc. VOJTĚCH NOVÁK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. PETR LICHÝ, Ph.D.

SUPERVISOR

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra metalurgie a slévárenství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Novák**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T038 Moderní metalurgické technologie
Téma: **Výroba odlitků a studium tepelných vlastností litých kovových pěn**
Production of Castings and Study of Thermal Properties of Cast Metal Foams
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Cíl práce
2. Analýza současného stavu výroby litých porézních kovů s pravidelnou strukturou
3. Experimentální ověření vybraných postupů, návrh vlastní metodiky
4. Diskuze dosažených výsledků
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] LEFEBVRE, L. P., BANHART, J., DUNAND, D. *Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments*. Advanced engineering materials. 2008, Vol. 10, No. 9, pp. 775-787.
- [2] DUKHAN, N. *Metal foams: Fundamentals and Applications*, Lancaster: DEStech Publications, 2013, 423 s., ISBN 978-1-60595-014-3.
- [3] PARK, C. *Porous and cellular materials for structural applications*. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, WadleyHNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 315.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: **Ing. Filip Radkovský**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřuji vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřisežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

- ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.
- ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.
- ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).
- ad 4) Prohlášení + místopřisežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.
- ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.
- ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.
- ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:
- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
 - Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

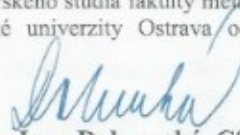
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava


PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě 22. 4. 2018


.....

podpis (jméno a příjmení studenta)

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se věnuje základním charakteristikám kovových litých pěn. První část práce je zaměřena na vývojové trendy, vlastnosti, oblasti použití tohoto odvětví. Velký důraz je zde kladen na jednotlivé výrobní metody a technologie, obzvlášť pro kovové pěny s pravidelným strukturním uspořádáním. Druhá část, která je již částí praktickou, je rozdělena na dvě sekce. Zabývá se výrobou odlitků z hliníkové slitiny v laboratorních podmínkách. Popisuje postup výroby kovových pěn jednou konkrétní slévárenskou technologií. Druhá polovina praktické části pojednává o simulační analýze pro proudění tepla s cílem získat co nejefektivnější tepelný výměník.

KLÍČOVÁ SLOVA: odlitek, kovová pěna, prekursor, výroba, tepelné vlastnosti, výměník tepla.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the basic characteristics of metallic foams. The first part of the thesis focuses on development trends, properties, field of application. Great emphasis is placed on individual manufacturing methods and technologies, especially for metallic foams with regular structured layout. The second part, which is already a practical part and is divided into two sections. It deals with the production of castings made of aluminum alloys under laboratory conditions. It describes the process of producing metal foams with one particular foundry technology. The second half of the practical part deals with simulation analysis for heat flow in order to obtain the most efficient heat exchanger.

KEY WORDS: casting, metal foam, space holder, production, thermal properties, heat exchanger.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, V. *Výroba odlitků a studium tepelných vlastností litých kovových pěn*. Ostrava, 2018. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Lichý Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této práce. Obzvlášť mému vedoucímu panu doc. Ing. Petru Lichému Ph.D., za cenné rady, profesionální přístup a vedení, ochotu a v neposlední řadě za trpělivost. Rovněž děkuji panu Ing. Filipu Radkovskému a paní Ing. Ivaně Kroupové za odbornou pomoc a konzultace zejména při řešení praktické části diplomové práce. Další komu chci poděkovat je Ing. Marek Gebauer Ph.D., za vynikající teoretické i praktické rady. Také nesmím opomenout Bc. Davida Polácha za příjemnou, bezproblémovou a motivující spolupráci.

Diplomová práce vznikla za podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu – TH02020668 – Vývoj technologických postupů výroby litých kovových pěn.

Děkuji za spolupráci

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektů "Studentské grantové soutěže" čísel SP2018/77 a SP2018/60.

Úvod	10
1 Charakteristika kovových pěn	13
1.1 Porézní materiály	13
1.2 Vývoj kovových pěn	14
1.3 Vlastnosti kovových pěn	14
1.4 Použití kovových pěn	15
1.4.1 Absorpce nárazové energie	16
1.4.2 Lehký konstrukční materiál	16
1.4.3 Akustika, tlumení vibrací a tepelné vlastnosti	17
2 Výroba kovových pěn	19
2.1 Přímé zpěňování kovů	19
2.1.1 Přímé zpěnění tavenin pomocí vstřikování plynu	20
2.1.2 Přímé zpěnění tavenin pomocí zpěňovačla	21
2.2 Slévárenské metody	23
2.2.1 Lití na odpařitelný model	23
2.2.2 Technologie Lost Foam	25
2.2.3 Materiály s mřížkovou strukturou	28
2.2.4 Výroba pěn litím kovu do dutiny formy vyplněné preformou	30
3 Obecný úvod k praktické části	34
4 Výroba odlitků	35
4.1 Pracovní postup a formování	35
4.1.1 Model a preforma	37
4.1.2 Tavení a odlévání	39
4.1.3 Odstranění vtokové soustavy, čištění a povrchová úprava	40
4.1.4 Analýza dosažených výsledků	41
5 Studium tepelných vlastností kovových pěn	43
5.1 Návrh modelu	43
5.2 Simulační procesy proudění	46
5.2.1 Parametry simulací	46
5.2.2 Vyhodnocení simulací	49
Závěr	54
Literatura	56
Seznam obrázků	59
Seznam tabulek	61

ÚVOD

Již několik let se snaží vědci a inženýři z celého světa vynalézt porézní kovy a kovové pěny, jež fungují na stejných principech a zákonitostech jako přírodní porézní materiály, např. kosti, dřevo a korály. Je tedy pochopitelné, že vývoj a výzkum kovových pěn se v současnosti těší velkému zájmu a je v centru dění v různých experimentálních střediscích. Proto se nelze divit, jak velký vývojový pokrok tento obor učinil v posledních letech. Poptávka po těchto specifických materiálech stále roste v širokém zastoupení průmyslových aplikací, obzvlášť v automobilovém průmyslu. Primárně z tohoto důvodu, počet různých typů pěn, zcela odlišných a ojedinělých vlastností, výrazně vzrostl. Každý z těchto typů se vyrábí odlišným způsobem.

Kovové pěny jsou kovovými materiály s dutinami na strukturální úrovni, které označujeme jako póry. Tyto póry ve struktuře záměrně utváříme s cílem zajistit co nejefektivnější kombinaci tepelných, akustických a mechanických vlastností. Z důvodu přítomnosti pórů, které nejsou nic jiného než vzduchové mezery tvořící velkou část objemu daného materiálu, by se dalo čekat, že snahou většiny odborníků bude počet těchto mezer co nejvíce zredukovat. U kovových pěn je však opak pravdou a je nutnost zabezpečit výskyt těchto pórů v optimálním počtu, ať už rovnoměrného nebo nerovnoměrného uspořádání v kovu. Jsou totiž klíčovým elementem pro zlepšení vlastností, hlavně v oblasti mechanického namáhání a další výhodou je nízká hmotnost.

Tato diplomová práce se skládá ze dvou částí – teoretické a praktické. Cílem teoretické části bylo seznámení s problematikou kovových pěn jako takových. Konkrétně jsem se zabýval obecnými charakteristikami kovových pěn – vývojovými trendy, vlastnostmi a komerčním použitím. Důraz jsem kladl na studium výrobních technologií a metod. Jelikož jsem se při práci na praktické části zaměřil na výrobu a studium hliníkových kovových pěn s pravidelným strukturálním uspořádáním, a rovněž v zadání mé diplomové práce je zhodnocení výroby tohoto typu pěn, zaměřil jsem většinu svého zájmu do této oblasti. Snažil jsem se shrnout všechny dostupné slévárenské způsoby výroby a důkladně je zanalyzovat. Dále jsem se zaměřil na popis, dle mého názoru nejpodstatnějších neslévárenských způsobů výroby. Je ovšem samozřejmé, že jsem se také snažil aspoň zběžně zmínit i druhý typ kovových pěn, a to s nepravidelným strukturálním uspořádáním.

Praktická část se skládala ze dvou experimentálních úkonů. V prvním jsem se zaměřil na výrobu odlitků z kovové pěny s pravidelným strukturním uspořádáním. To zahrnovalo výrobu forem, zjištění optimálních teplot, odlévání v laboratorních podmínkách, čištění a obrábění odlitků. Pro výrobu kovových pěn byla zvolena metoda lití kovu do dutiny formy vyplněné preformou. Preformy byly dodány akademickými pracovníky z VŠB-TU Ostrava.

Druhým tématem praktické části byla simulační analýza tepelných vlastností kovových pěn. Ta probíhala ve třech etapách, nejdříve bylo potřeba navrhnout konstrukci modelů pro simulaci v programu Autodesk Inventor 2018 Professional, následně nastavit parametry pro experimentální simulace v programu Ansys 18 a v závěru zhodnotit výsledky simulací. Snahou bylo najít ideální tvar preforem pro co nejefektivnější tepelný výměník.

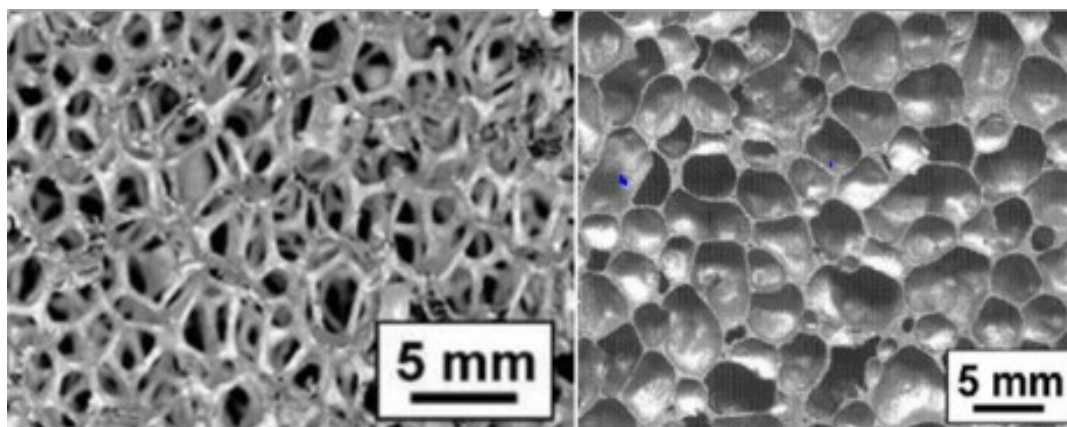
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTIKA KOVOVÝCH PĚN

Kovové pěny jsou izotropní porézní materiály obsahující póry v jejich struktuře. Póry jsou úmyslně vytvořené různými technologiemi. Vzniklá porézní struktura jim dává neobyčejné vlastnosti jak mechanické, tak fyzikální, což souvisí s nízkou hustotou, vysokou tuhostí a výbornou schopností pohlcovat energii, vibrace a zvuk.

Kovové pěny se mohou vyrábět z různých materiálů, jako jsou například zinek, měď, hliník, litina, hořčík, titan, železo apod. Pro výrobu pěn je však nejvhodnější hliník, pro svou nízkou hmotnost, houževnatost, vysokou pevnost a korozní odolnost.

Kovové pěny dělíme podle jejich struktury na kovové pěny s otevřenými nebo uzavřenými póry (viz obr. 1) [1], [2].



Obr. 1 Otevřená buněčná struktura – vlevo / uzavřená buněčná struktura – vpravo [4]

1.1 Porézní materiály

Porézní struktury se vyskytují v přírodních materiálech – struktury kostí, dřeva a listů. U těchto struktur se kombinuje poměrně vysoká tuhost a pevnost s nízkou hustotou. Obecně se používají u případů, kdy je třeba minimalizovat hmotnost ve spojitosti s velikostí a tvarem buněk tak, aby odpovídaly požadavkům v různých částech struktury. Porézní struktury také poskytují zvýšenou odolnost proti poškození, protože jejich relativně otevřené struktury mohou absorbovat velké napětí v tahu a tlaku [1], [3].

Určitě tedy není překvapující, že vlastnosti přirozených porézních struktur byly implementovány ve zpracovatelských výrobních materiálech. Polymerní pěny se běžně používají jako ochranná pouzdra v obalových přípravcích a na nárazuvzdorné materiálové aplikace, např. na cyklistické přilby, zejména díky své schopnosti snášet velké tlakové napětí a absorbovat značné množství energie při poměrně nízkém tlakovém napětí. Používají se také

jako lehký konstrukční materiál, např. jako materiál jádra v tenkostěnných panelech, vzhledem k jejich vysoké specifické tuhosti a pevnosti v ohybu [1], [3].

Kovy mohou absorbovat velké množství energie v deformaci v důsledku pohybu dislokací. Kovové pěny by tak mohly poskytnout konstrukční materiál s výhodnými mechanickými vlastnostmi polymerních pěn vhodných pro použití v případech, kdy je vyžadována vyšší mezní napětí a absorpce energie [2].

1.2 Vývoj kovových pěn

Kovové pěny lze obecně rozdělit do dvou kategorií: na pěny s uzavřenými buňkami, které obsahují uzavřené póry a pěny s otevřenými buňkami, u nichž jsou póry otevřené. Oba typy pěn se vyvíjí více než 50 let. Nicméně většinu tohoto času byly považovány spíše za akademickou raritu, než za opravdový průmyslový materiál [5].

Avšak v polovině devadesátých let vzrostl zájem o vývoj kovových pěn, což korespondovalo s významným zlepšením dostupných výrobních procesů. Vedle velkého počtu jednotlivých experimentálních projektů byly zahájeny dva rozsáhlé výzkumné programy: prvním byl čtyřletý výzkumný program týkající se ultralehkých kovových konstrukcí na britských a amerických univerzitách od roku 1996 a druhým byl prioritní program pro porézní kovy na několika německých univerzitách v roce 1999 s názvem DFG [3], [5].

1.3 Vlastnosti kovových pěn

Kombinací charakteristických vlastností kovových pěn a porézních materiálů získáme takové specifika, které nejsou ani zdaleka možné reprodukovat materiály jako například polymery, kovy, keramika či keramické pěny. Mluvíme-li o kovových pěnách, hovoříme o materiálech s objemovým podílem plynových pórů, tzv. porezitě, v rozmezí 40–98 %. Ve srovnání s pěnamy na bázi polymeru je jejich tuhost značně vyšší. Jejich stabilita je větší i při zvýšených teplotách, jsou nehořlavé a neuvolňují toxické plyny. Podstatnou výhodou oproti polymerům nebo keramice je jejich snadná recyklovatelnost, proto jsou velmi užitečné z hlediska ekologie a životního prostředí [5], [6], [7].

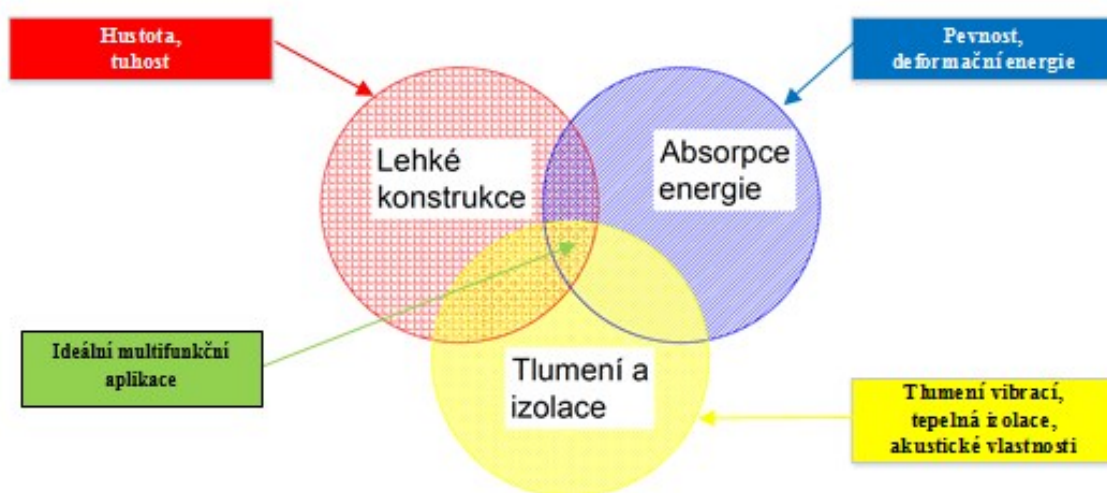
Vlastnosti kovových pěn závisí na několika faktorech [7], [8]:

- morfologie – typ pórovitosti (otevřené a uzavřené póry), požadovaná porezita materiálu, velikost a tvar póru,
- metalurgie – požadovaný kov či slitina, mikrostruktura,
- zpracování – pravidelné nebo nepravidelné buněčné uspořádání,
- ekonomická náročnost – náklady a vhodnost pro velkosériovou výrobu.

1.4 Použití kovových pěn

Pěny s otevřenými buňkami mají křehkou strukturu, velký měrný povrch, vysokou elektrickou a tepelnou vodivost. Což umožňuje jejich použití v řadě specializovaných aplikací, jako jsou držáky katalyzátorů, výměníky tepla, vysokoteplotní filtry, spotřební baterie a elektromagnetické absorbéry [5], [7].

Žádná materiálová vlastnost kovových pěn s uzavřenými buňkami není mimořádná. Komerční využití těchto pěn tedy náleží zejména hliníkovým pěnám z důvodů vlastností, které jiné materiály nejsou schopny zajistit, jako jsou vysoká pevnost, nízká hustota a schopnost podstoupit vysoký stupeň trvalé plastické deformace při téměř konstantním mezním napětí. Proto byly navrženy dvě hlavní použití tohoto zpracování: pro absorpci nárazové energie a jako lehký konstrukční materiál. Obr. 2 popisuje rozsahy použití [5], [8].



Obr. 2 Rozsah aplikací kovových pěn [9]

1.4.1 Absorpce nárazové energie

Kovové pěny mohou pohlcovat poměrně velké množství mechanické deformační energie z důvodu vysoce porézní struktury. Tudiž se používají tam, kde tyto vlastnosti uplatní – lehké obrnění vozidel a vojenské techniky (obr. 3), ochranné obaly, deformační zóny dopravních prostředků, průmyslových dopravníků, výtahových systémů. Při nárazu se začínají jako první deformovat vrchní vrstvy buněk a až po jejich úplném zdeformování působí síla i na další vrstvu buněk. Díky tomuto procesu deformace vznikne obrovské stlačení, které je schopno absorbovat až 84 % energie nárazu [5], [9], [10].



Obr. 3 Kabina vlaku vyrobená za využití kovové pěny [7]

1.4.2 Lehký konstrukční materiál

Jelikož mají pěny vysokou tuhost a nižší hustotu než jejich základní materiál, je jejich aplikační potenciál v oblasti lehkých konstrukcí poměrně velký. Pokud bude hlavním tématem pevnost, tak jí pěny mají často podobnou nebo mírně horší než pevné materiály stejné hmotnosti. Díky tomu jsou pěny užitečné jako nosné komponenty v místech největšího tahového namáhání při zachování požadovaných mechanických vlastností. Umožňují uplatnění v leteckých a automobilových (obr. 4) aplikacích. Dále se využívají jako tuhé a lehké konstrukce v průmyslových robotech, v automatizačních a manipulačních zařízeních. Pěny lze také použít k naplnění nosníků nebo potrubí, kde se využije jejich zvýšená konstrukční tuhost [5], [10].

Pěnový hliník nachází uplatnění jako vnitřní část v sendvičových panelech, výplň trámových konstrukcí, trvalá jádra hliníkových odlitků aj.



Obr. 4 Výztuha sloupku karosérie automobilu z pěny [11]

1.4.3 Akustika, tlumení vibrací a tepelné vlastnosti

Hliníkové pěny mohou za určitých podmínek poměrně dobře tlumit vibrace a pohlcovat zvuk. Na obr. 5 jsou ukázky různých tlumičů hluku z hliníkové pěny.



Obr. 5 Tlumiče hluku z hliníkové pěny [7]

Kovové pěny s otevřenými póry jsou také vodivé, propustné a korozivzdorné. Tato kombinace vlastností je činí atraktivní pro různé tepelné aplikace (výměníky tepla, chladiče, tepelné trubky). Různá výzkumná centra v současnosti pracují na charakterizaci a modelování přenosu tepla a výměny tepla v kovových pěnách s různými strukturami. Výměny tepla v kovových pěnách jsou složitými jevy. Účinnost výměny tepla je ovlivněna vodivostí pěny, výměnou tepla mezi pěnou a okolní tekutinou a poklesem tlaku v pěně. Tyto charakteristiky jsou všechny ovlivněny několika strukturálními parametry (hustota, rozložení velikosti pórů, propojení s buňkami, křehkost, drsnost povrchu atd.), které lze obtížně měřit a integrovat. Je tedy jasné, že tato problematika kovových pěn ještě není zcela prozkoumána [5], [12], [13].

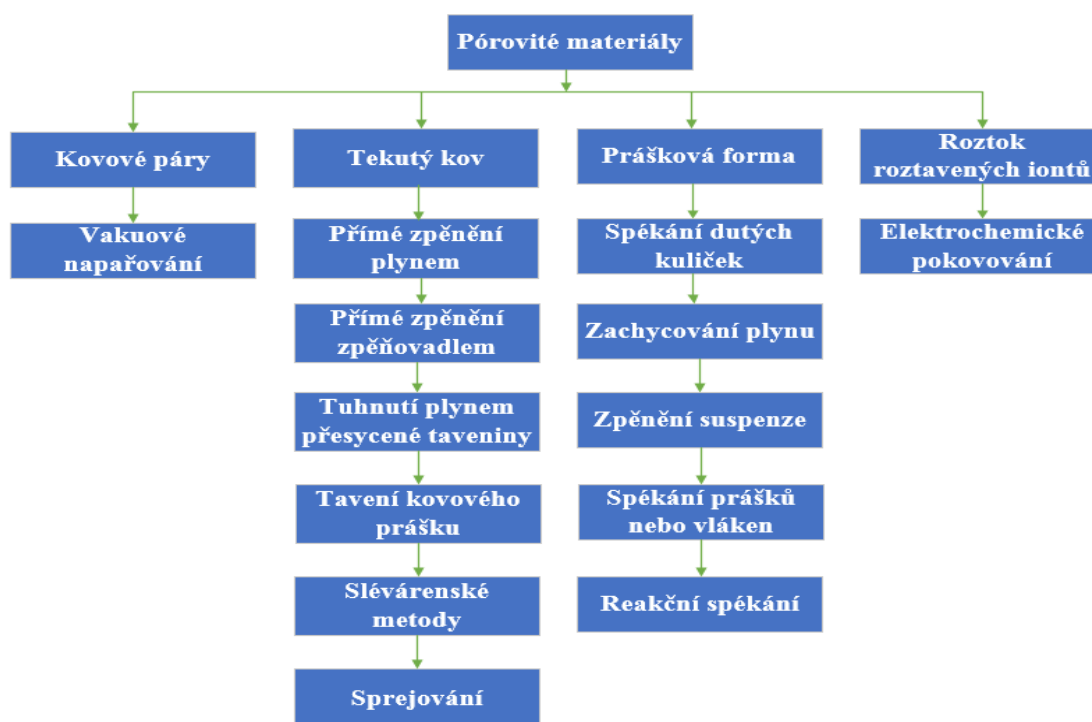
U kovových pěn s uzavřenými póry je tepelná vodivost naopak nízká, zatímco jsou poměrně odolné vyššímu tepelnému namáhání. Proto se jich dá využít při konstrukci různých nehořlavých tepelných štítů či tepelných izolátorů [5], [8], [9].



Obr. 6 Prototypy tlumičů nárazu z hliníkové pěny od společnosti Cymat [9]

2 VÝROBA KOVOVÝCH PĚN

Existuje mnoho způsobů výroby porézních celulárních kovových materiálů. Některé metody jsou podobné metodám používaným pro pění vodných nebo polymerních kapalin, jiné jsou založeny na charakteristických vlastnostech kovů. Metody lze klasifikovat podle stavu, ve kterém se kov zpracovává na čtyři skupiny – výroba z tekutého kovu, z pevného kovu v práškové formě, z kovových par nebo plynných kovových sloučenin, z roztoku kovových iontů (viz obr. 7) [2].



Obr. 7 Přehled možností pro výrobu kovových pěn [2]

2.1 Přímé zpěňování kovů

Taveniny z kovového materiálu mohou být zpěňovány za přesně daných parametrů vytvářením plynových bublin v tavenině. Obvykle plynové bubliny, které jsou vytvořeny v kovové tavenině, mají tendenci rychle vyplouvat k jejímu povrchu kvůli vysokým vztlakovým silám a vysokou hustotou. Tomuto jevu lze zabránit tak, že se zvýší viskozita taveniny přidáním jemného keramického prášku nebo legovacími prvky, které tvoří stabilizující částice v tavenině [2], [5], [7].

V 60. a 70. letech proběhlo mnoho pokusů o zpění tavenin tímto způsobem, většinou za použití hliníku, hořčíku, zinku nebo slitiny na bázi jednoho z těchto kovů. Ačkoli byly

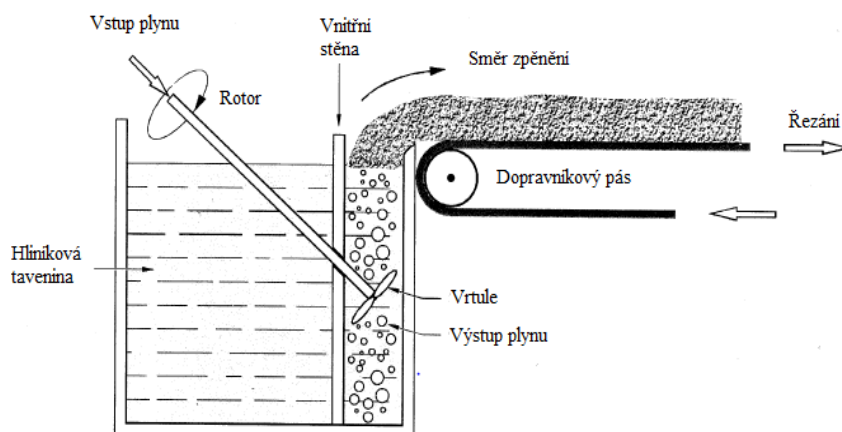
vyrobeny některé velmi dobré kovové pěny, materiál nenašel uplatnění pro průmyslovou aplikaci. Důvodem byla nedostatečná kvalita materiálu a primárně cena. V uplynulých 10 letech však došlo k řadě nových postupů, které výrazně zlepšily výrobní postupy [2], [5], [7].

V současné době existují dva způsoby přímého zpěňování kovových tavenin. Jedná se o vstřikování plynu do tekutého kovu z vnějšího zdroje nebo přidání zpěňovadel uvolňujících plyn do roztaveného kovu. Je potřeba říci, že jeden z patentů napsaných ve 40. letech naznačoval použití druhého kovu jako zpěňovadla, např. rtuť pro napěnění hliníku. Tento druhý kov se odpařuje při ohřevu hliníku na teplotu tání a vytváří tak póry. [2], [5]

2.1.1 Přímé zpěnění tavenin pomocí vstřikování plynu

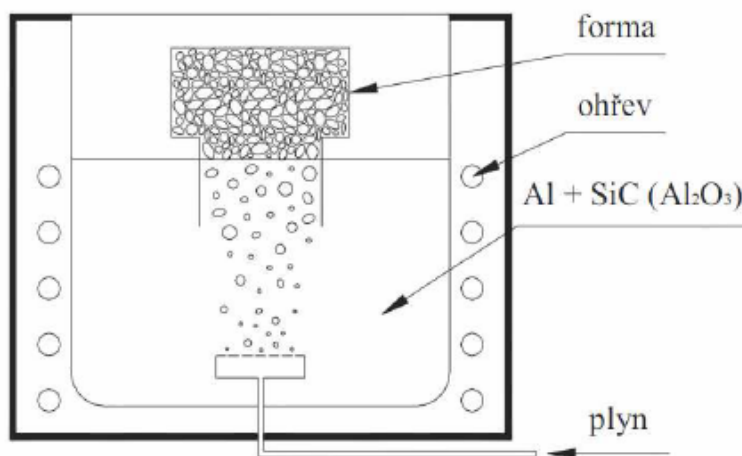
Pěnění hliníku nebo hliníkových slitin vstřikováním plynu je v současnosti jedna z nejvyužívanějších metod. Karbid křemíku, oxid hlinitý nebo jiné keramické částice se musí smíchat, aby slitina pěnila. Objemový podíl stabilizujících částic se typicky pohybuje v rozmezí od 10 % do 20 % a střední velikost částic od 5 μm do 20 μm . Vstřikování plynu (obvykle vzduch) se provádí pomocí speciálně navržených vstřikovačů, které jsou navrženy tak, aby se otáčely nebo vibrovaly. Výsledná pěna se hromadí na hladině kapaliny, odkud může být odebrávána, například dopravníkovým pásem. Poté se nechá ochladit a ztuhnout (viz. obr. 8) [1], [2].

Pěnový materiál se používá buď ve stavu, ve kterém vychází z lícího stroje a má uzavřený vnější povrch nebo je po pěnění vyříznut do požadovaného tvaru. Výhodami tohoto způsobu pěnění je velký objem a nízká hustota pěny. Takto pěnu vyrábí společnost Cymat Technologies v Kanadě a nazývá ji "Stabilized Aluminium Foam (SAF) - Stabilizovaná hliníková pěna. [1], [2]



Obr. 8 Schéma výroby metodou SAF [2]

V nedávné době byl způsob pro zpěňování taveniny inovován vědci pracujícími v Light-metals Competence Centre (LKR) a hutním závodě v Kleinreichenbachu (HKB) v Rakousku. Klíčovým bodem je nová koncepce vstřikování plynu, podle které lze vyrobit pěny s vynikající celistvostí a různou velikostí buněk. Základem procesu, jenž je znázorněn na obr. 9, je vytváření plynových bublin v tavenině, které stoupají vzhůru k povrchu taveniny a hromadí se v dutině formy. Potom následuje ochlazení a následné obrobení odlitku. Podle účelu použití se vytváří s otevřenými i uzavřenými buňkami. K legování se používají částice karbidu křemíku nebo oxidu hlinitého v obsahu okolo 20 % hmotnosti. Hustota produktů vyrobených touto metodou se pohybuje od 0,4 – 0,9 g/cm³. Komerční využití tohoto druhu hliníkové pěny se nazývá Metcomb [1], [12].



Obr. 9 Výrobní schéma metody Metcomb [12]

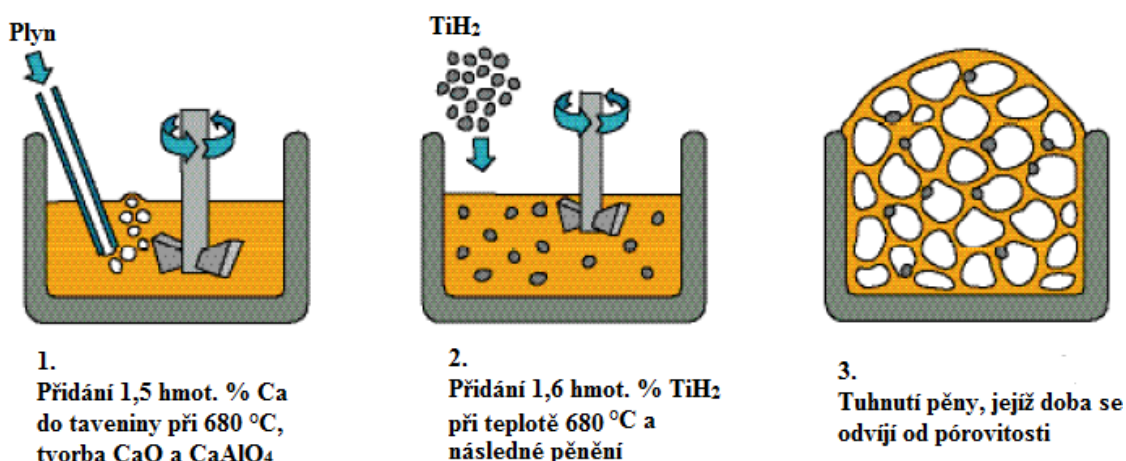
2.1.2 Přímé zpěnění tavenin pomocí zpěňovadla

Přímého zpěnění taveniny lze také dosáhnout přidáním práškového chemického pěnivého činidla neboli zpěňovadla. To je stabilní při pokojové teplotě, ale uvolňuje plyn při teplotě tavení. Jediné zpěňovadlo používané komerčně je hydrid titaničitý (TiH₂), které se rozkládá na titan a plynný vodík při teplotách nad 400 °C reakcí:



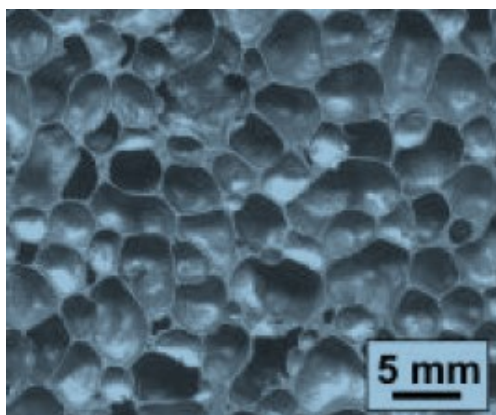
Zpěňovadlo tedy může být přidáno přímo do taveniny za předpokladu, že prášek je rovnoměrně rozptýlen před začátkem tepelného rozkladu a uvolněný vodík vytváří póry v celém kovu. Stejně jako při přímém přidávání plynu je nezbytné stabilizovat roztavenou pěnu proti zhroucení, což se obvykle dosahuje přidáním reaktivního legovacího prvku, např. vápníku nebo hořčíku do taveniny za intenzivního míchání a probublávání vzduchu [2], [5].

Tento proces se komerčně používá k výrobě hliníkových pěn Alporas (viz obr. 10). Nejdříve se pro zvýšení viskozity do taveniny přivádí plyn, přidává 1,5 - 3 hmot. % kovového vápníku a po dobu 6 minut při teplotě 680–720 °C se tato směs míchá, čímž se tvoří jemné pevné částice CaO a CaAlO₄. Potom se přidá 1,6 hmot. % TiH₂ a tavenina se udržuje na teplotě 680 °C po dobu 4 až 15 minut. Tím tavenina dosáhne požadované viskozity. Poté se při této teplotě TiH₂ začíná rozkládat a v důsledku toho se vytváří vodíkové bubliny. Následně tavenina začne expandovat a její objem narůstá, dokud se nezaplní celá dutina formy. Po ochlazení hliníkové pěny pod teplotu tání hliníku se získá tuhý blok pěnového hliníku [5].



Obr. 10 Přímé pění zpěňovadlem se zvýšenou viskozitou [5]

Takto se vyrábějí bloky o rozměrech 2400 x 700 x 450 mm s hmotností cca 180 kg, ze kterých lze získat dělením panely, desky a jiné výrobky. Hustota materiálu těchto výrobků (po odřezání souvislé povrchové vrstvy bloku) se pohybuje v rozsahu 0,18 – 0,24 g.cm³ a velikost pórů je cca 2–10 mm [2], [5], [7].



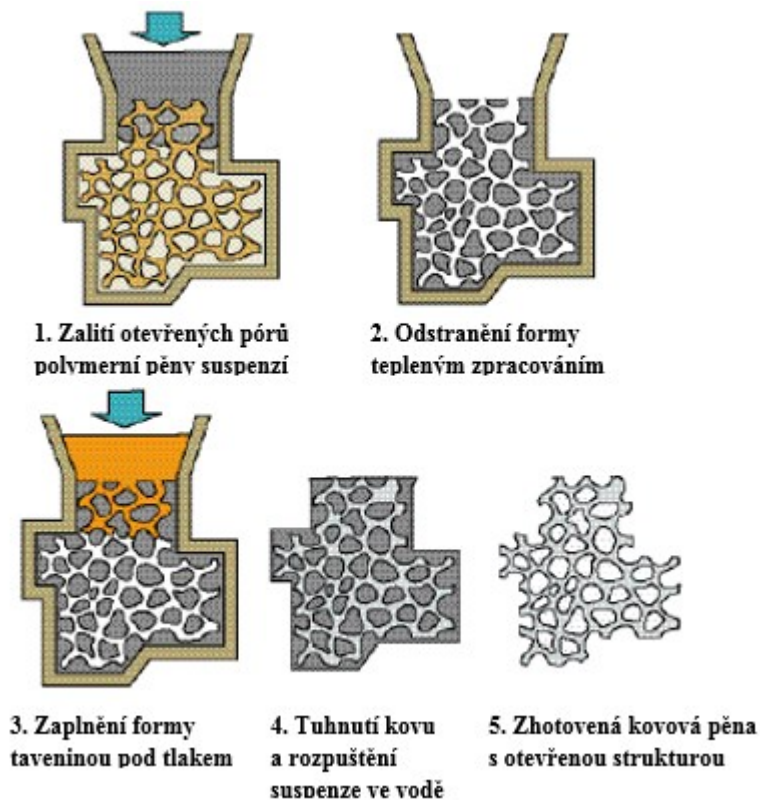
Obr. 11 Struktura pěny Alporas se zvýšenou viskozitou [14]

2.2 Slévárenské metody

Slévárenské metody výroby kovových pěn umožňují výrobu tvarově složitých odlitků s možností volby pórovitosti a rozměru buněk. Výroba ve slévárenském průmyslu se obecně vyznačuje tím, že po odlití kovu do připravené formy vzniká již hotový produkt, který již není třeba náročně upravovat či obrábět. S ohledem na tento aspekt, se tyto metody používají k výrobě kovových pěn s otevřenou buněčnou strukturou, kde je nutné odstranit formovací materiál. Tento materiál sloužil jako nosná kostra pro vytvoření požadované struktury a jeho odstranění prodlužuje dobu výroby. Existuje zde i možnost výroby pěn s uzavřenými buňkami, avšak za předpokladu, že materiál tvořící dané buňky zůstává v odlitku. K vytvoření materiálu s uzavřenými buňkami se více uplatňuje technologie přímého zpěnění plynem [8], [10].

2.2.1 Lití na odpařitelný model

Pěny mohou být vyrobeny z tavenin, aniž by musely být přímo zpěňovány. Tento proces je znázorněn na schematickém popisu na obr. 12, kde se využívá vlastností polymerní pěny, konkrétně polyuretanové pěny. Pokud má polymerní pěna uzavřené póry, musí být transformována na otevřenou porézní vrstvu, čehož se dosáhne tzv. síťovým zpracováním. Výsledná polymerní pěna s otevřenými buňkami se obalí suspenzí s dostatečně žáruvzdorného materiálu, např. směsí mullitu, fenolové pryskyřice a uhlíčitanu vápenatého nebo prostou sádkou. Po vytvrzení se polymerní pěna odstraní tepelným zpracováním při teplotě cca 700 °C a poté se tavenina vlévá do vzniklých otevřených dutin, kde kopíruje původní strukturní tvar pěny. Při nedostatečné zabíhavosti a nedosažení plnění úzkých dutin tekutým kovem klasickým gravitačním litím, je nezbytné předeheat formy a použití tlakového lití. Po odstranění formovacího materiálu (např. otryskáním) je vytvořena přesná kopie původní polymerní pěny v podobě kovové pěny. Potíže vyskytující se u tohoto procesu mohou například zahrnovat dosažení úplného naplnění vláken, ovládání směrového tuhnutí či odstranění formovacího materiálu bez přílišného poškození struktury [2], [7].



Obr. 12 Postupové schéma metody lítí na odpařitelný model [5]

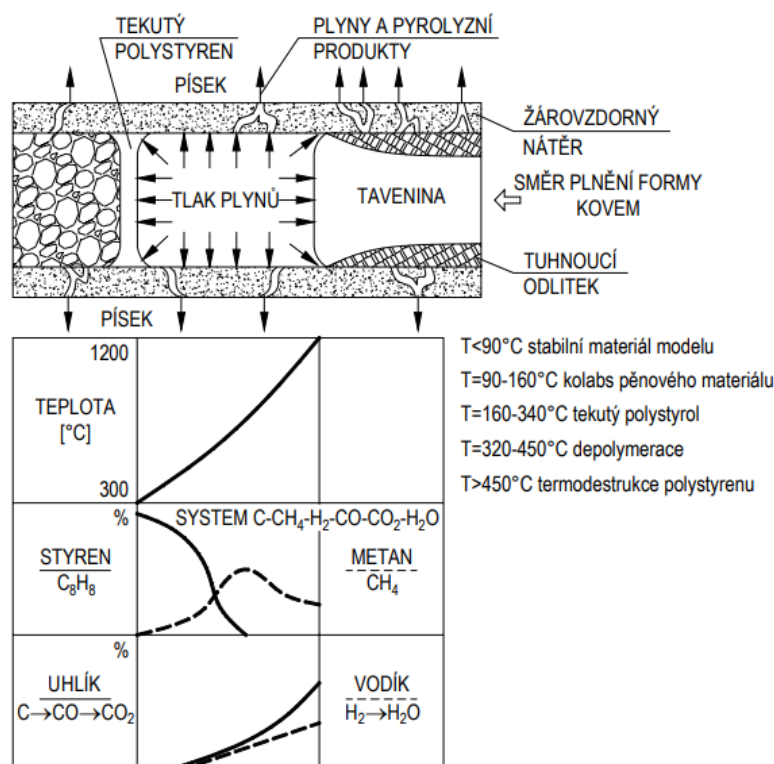
Kovové pěny vyrobené touto metodou distribuuje firma ERG z Oaklandu pod záštitou značky Duocel (viz. obr. 13). Dostupné jsou různé kvalitativní stupně a velikosti. Nabízejí komplexně tvarované díly jak z hliníkových slitin (6101 nebo AlSi7Mg), tak i z jiných neželezných kovů (měď, hořčík). Pórovitost se typicky pohybuje od 80 % do 97 %. Nevýhodou výrobního procesu je nákladnost, složitost výrobního postupu a malé objemy výroby [2], [7].



Obr. 13 - Ukázka odlitku z pěny Duocel vyrobeného na Achenské univerzitě [2]

2.2.2 Technologie Lost Foam

Tato technologie se využívá k výrobě kovových pěn s pravidelným strukturním uspořádáním. Pěny se vyrábějí litím na odpařitelný nebo spalitelný model, který je základem celé technologie. Pro hliníkové slitiny se model převážně zhotovuje z expandovaného polystyrenu (EPS), popřípadě polymethylmetakrylátu (PMMA). Modely pro kusovou výrobu se vyrábějí k jednomu použití lepením, řezáním nebo frézováním z pevných bloků, následně jsou zaformovány do formovací směsi s pojivem. U velkosériové výroby se model vyrábí ve vypěňovací formě, poté se namočí do ochranného nátěru a zapěchuje do suchého křemenného písku (viz obr.17). Mezi důležité parametry postupu této technologie patří prodyšnost nátěru a formy, hustota napěněného materiálu, lící teplota a vtoková soustava [15], [16].



Obr. 14 Princip postupu kovu v „plné formě“ tvořené suchým křemenným pískem [15]

V první fázi technologie Lost Foam probíhá tzv. předzpěnění materiálu. Z důvodu přítomnosti pentanu (zvýšením teploty na cca 100 °C) polystyren expanduje. Zahřátím materiálu se kuličky polystyrenu zvětší asi 30krát oproti původní velikosti vlivem přetlaku pentanu. Tato fáze je důležitá z hlediska redukce měrné hmotnosti materiálu, protože z původních 600 g·l⁻¹ se snížila na cca 15–40 g·l⁻¹. Přehřátý materiál se dále chladí v meziskladech v látkových zásobnících, které zajišťují snadné odvětrávání předzpěněného skladovaného materiálu [15], [17].

Druhá fáze je nejdůležitější částí, protože se zde vyrábí model. Ten se vyrábí z kuliček polystyrenu o stejné granulometrii. Kuličky expandují tak, že se do vyhřátého jaderníku vhání horká pára. Proces vypěňování probíhá ve vypěňovací formě umístěné ve vypěňovacím lisu. Po vypěnění se model vysuší a v případě složitějších tvarů se na něj nalepí další potřebné součásti [15], [16].



Obr. 15 Zařízení pro výrobu modelů z polystyrenu [15]

Třetí fáze zajišťuje tvorbu vypěňovací formy. Ty se konstruuji s ohledem na tvar modelu a s cílem minimalizovat výskyt tepelných uzlů, zabezpečit dostačující odvětrání, a hlavně hladký povrch. Taktéž je nutné zamezit jakékoliv kondenzaci vody během procesu pění [15], [18], [19].

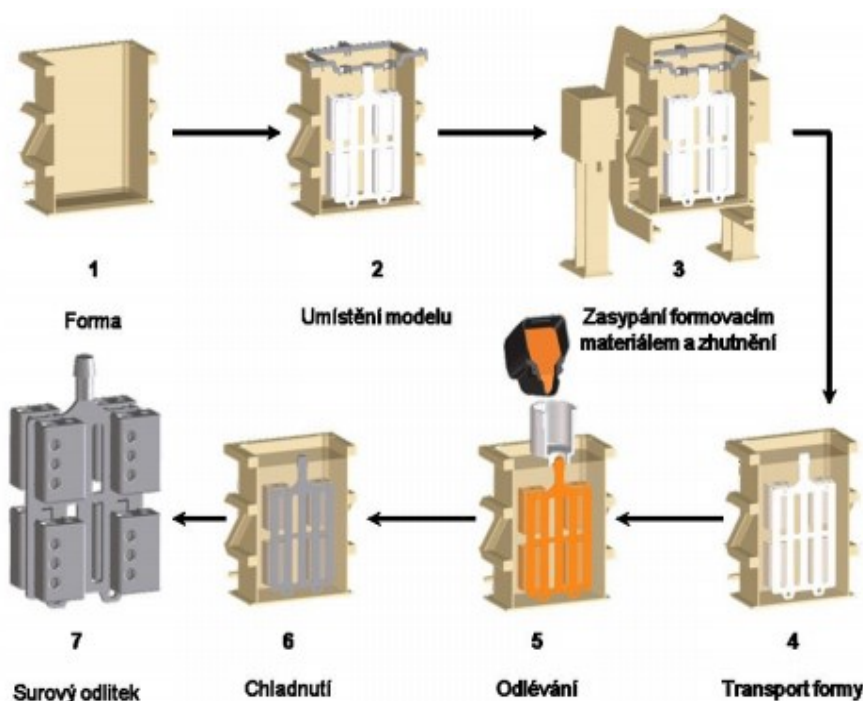
Ve čtvrté fázi se nanáší ochranný nátěr (obr. 16). Ten musí být ze silně žáruvzdorného materiálu, v tenké vrstvě kvůli prodyšnosti a rovnoměrně nanesen v celém objemu již zkompletovaného modelu. Model se většinou opatrně ponoří do velkých kádí, ale může se také ručně natírat štětcem. Používají se koks–grafitové, aluminosilikátové vodní nebo zirkonové typy nátěrů. Po aplikaci ochranného nátěru se model suší při cca teplotách 60 °C a uskladní ve vytopeném skladu [8], [15], [20].



Obr. 16 Ukázky nanášení ochranného nátěru a sušení modelu [20]

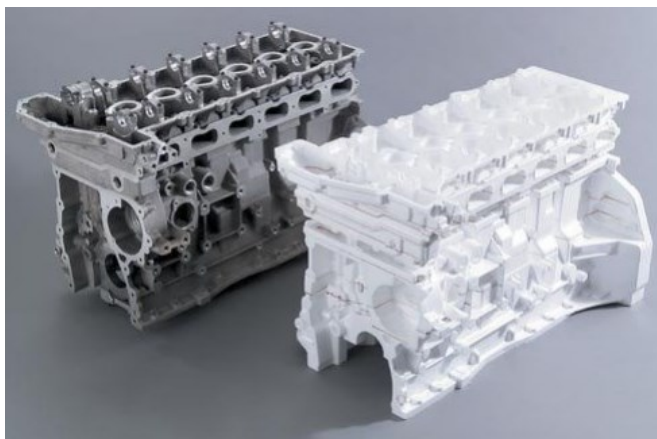
V předposlední fázi se navrhuje vtoková soustava. Vzhledem k předpokladu, že pomalá rychlost lití iniciuje větší velikost vznikající plynové mezery mezi modelem a proudem kovu, a tudíž i vznik případných vad jako jsou zavaleniny, nesouvislý povrch či nauhličení z pyrolýzních produktů při spalování polystyrenu, je nezbytné zvolit konstrukci vtokové soustavy, aby bylo zajištěno dostatečně rychlé zaplnění dutiny formy. Neoptimálnější rychlost lití se pohybuje v rozmezí 1 až 5 cm s⁻¹. Dále je třeba myslet na dimenzování vtokové soustavy, na které přímo závisí kvalita daného odlitku. Používá se horní, spodní nebo i boční vtok, pokud je odlitek velkých rozměrů. Nejpoužívanějším vtokem je spodní, nicméně i tady existuje riziko vzniku vad, a to plynových, z důvodu malé plochy pro odvod plynů (tvoří ji pouze volný prostor mezi stoupajícím kovem, a ještě nezplyněným modelem). Proto se u této metody zvyrazňuje potřeba vysoké propustnosti plynů formovací směsi a nátěrů [15], [18], [19].

Při poslední fázi probíhá zasypání formy formovacím materiálem. V současnosti se používá v podstatě jen suchý písek bez jakýchkoliv pojivových přísad. Polystyrenový model se vypařuje vlivem tepla odlévané taveniny a kov nahrazuje místo po modelu [8], [15], [17].



Obr. 17 Schéma výrobního procesu technologie Lost Foam [8]

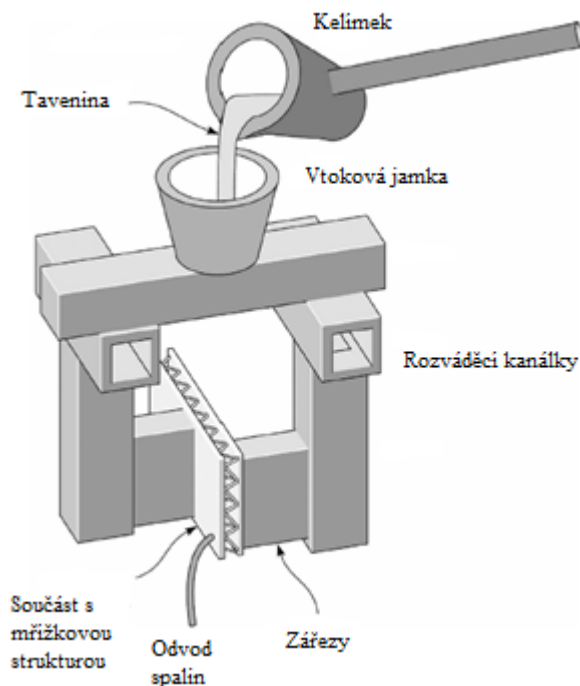
Mezi hlavní výhody technologie Lost Foam patří nižší pořizovací náklady oproti konvenčním metodám, nepotřebnost klasických jaderníků, forem či pískového hospodářství. Dále vysoká přesnost odlitků, možnost předlití otvorů, minimalizace nákladů na obrábění a vysoké využití kovu. Primární nevýhodou je značná počáteční investice do vypěňovacího zařízení, proto metoda Lost Foam nachází uplatnění pouze ve velko-sériové výrobě (obr. 18) [8], [15], [17].



Obr. 18 Odlitek bloku motoru (vlevo) a jeho model (vpravo) [17]

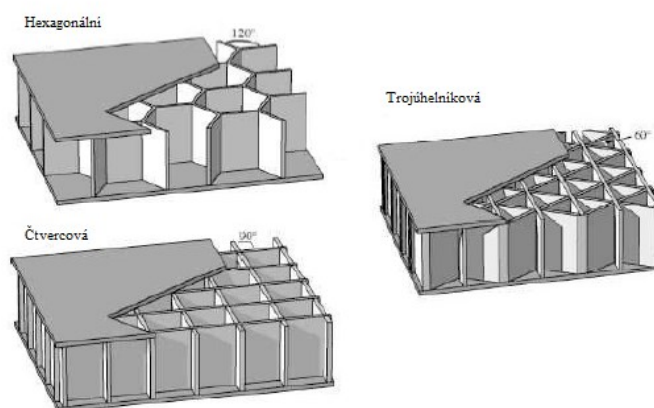
2.2.3 Materiály s mřížkovou strukturou

Dalším typem vysoce pórovitých kovů jsou materiály s mřížkovou strukturou. Ty se dají získat metodami lití na spalitelný, vytavitelný nebo odpařitelný model a v literatuře jsou označovány jako „Lattice block materials“ (LBM). Jedná se o materiály s pravidelným uspořádáním buněk, kde podíl kovu ve struktuře bývá menší než 20 %. LBM jsou opakující se buňky tvořeny přímými žebry, která jsou spojena dvěma uzly. Uzly jsou shodné se strukturou a jsou napojeny např. na 12 a 14 podpěr. Tyto struktury sloužící jako model mohou být vyhotoveny vstřikováním plastických hmot do formy, postupným lepením prvků konstrukce vrstva po vrstvě a složitější tvary mohou být vyráběny metodou Rapid Prototyping. Používanými materiály pro výrobu jsou vosky nebo polymery. Tento způsob se používá pro metody lití na vytavitelný a spalitelný model. Pro technologii odpařitelného modelu se často využívá model z ABS plastu (Akrylonitrilbutadienstyren). Model se dále připojí ke vtokové soustavě, která se jako celek následně obalí keramickou licí suspenzí a po jejím vytvrzení dochází k odstranění modelu tepelným zpracováním. Vzniklá soustava se pak zaplní kovem. Získaný kovový odlitek má stejně uspořádanou strukturu jako model s přesně definovaným tvarem a velikostí pórů. Pro materiály s mřížkovou strukturou je typická vzdálenost mezi žebry 6,5 až 25 mm a průměr žebíků 1,5 až 3,8 mm. Postup takové výroby znázorňuje obr. 19. [10], [17].



Obr. 19 Schéma výroby kovové pěny z ABS plastu [10]

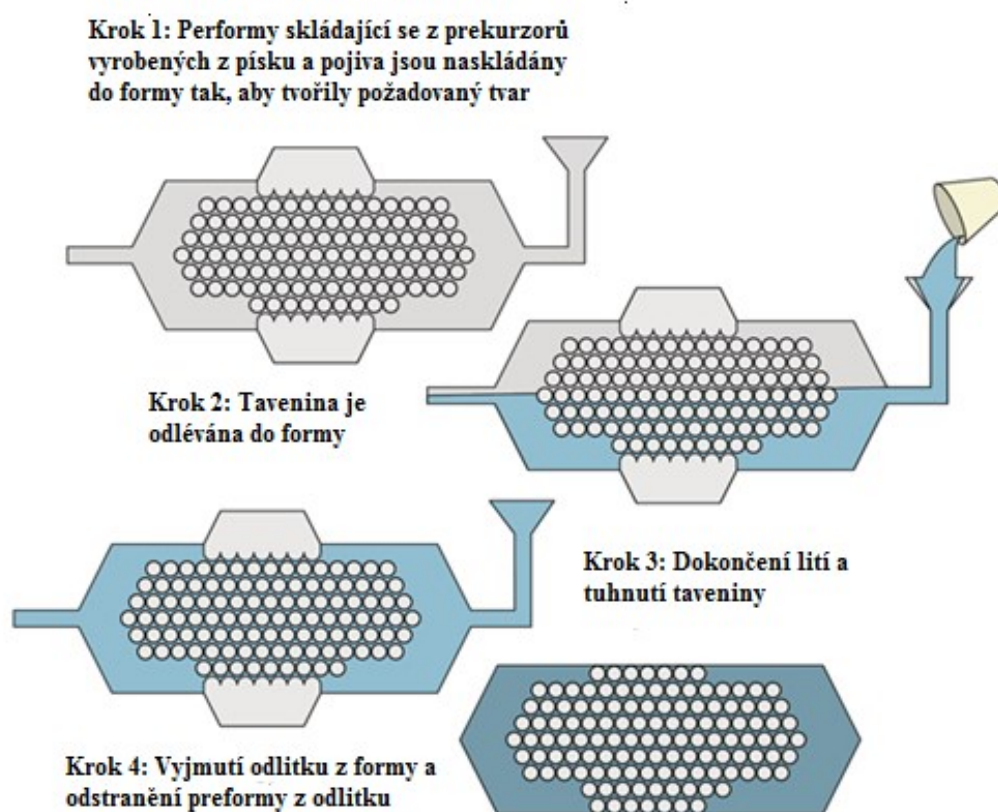
Některé materiály s mřížovou strukturou se vyrábí plošným tvářením nebo různými metodami pojení jednotlivých plátů, např. mikrosvařováním, ale stále častěji je zájem o lité struktury. Výhodou odlévání mřížových struktur je ta, že tato metoda nevyžaduje složité montáže, lepení nebo svařování, abychom dosáhli stejné struktury. Výhodou procesu je možnost dosažení optimálních a předvídatelných mechanických vlastností materiálu, které lze navíc snadno reprodukovat. Mřížková struktura také umožňuje vyrobit různé geometrické tvary, širokou škálu výroby kovů a snadnou recyklovatelnost těchto materiálů (viz obr. 20) [10], [21].



Obr. 20 - Ukázky třech základních typů mřížkové struktury [21]

2.2.4 Výroba pěn litím kovů do dutiny formy vyplněné preformou

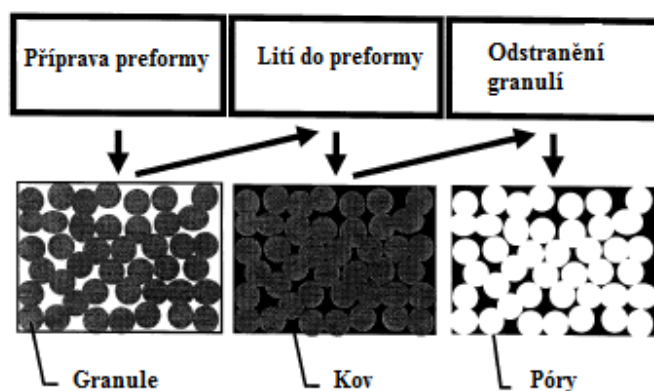
Touto metodou se vyrábějí lehké pórovité materiály s pravidelnou strukturou. Metoda je schematicky popsána na obr. 21. Tavenina se odlévá kolem anorganických či organických granulí nebo dutých kuliček s nízkou hustotou (prekurzorů), které tvoří celistvé desky zvané preformy, sloužící jako jádra velmi složitých tvarů v dutině formy. Prekurzory buď zůstávají po odlití v kovovém výrobku a tvoří "syntaktickou pěnu" nebo se odstraňují loužením ve vhodných rozpouštědlech a kyselinách či tepelným zpracováním. To lze úspěšně provést, jen pokud je obsah prekurzorů dostatečně velký, aby byly všechny prekurzory navzájem propojeny. Pro anorganické preformy se používá vermikulit, vypálené hliněné kuličky, kuličky písku s pojivem, rozpustné soli a duté kuličky oxidu. Jako organické preformy mohou sloužit různé polymerní kuličky, pouze ale za předpokladu, že je tuhnutí kovu dostatečně rychlé, aby nedošlo k jejich předčasnému spálení a zborcení kovové struktury [2], [11], [22].



Obr. 21 Schéma výroby kovových pěn litím do preformy [22]

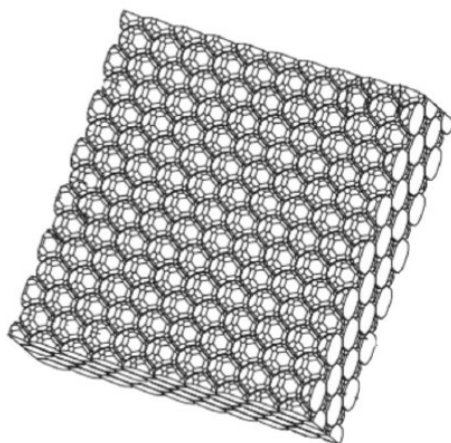
Preformy se většinou předehtřívají z důvodu zabránění předčasnému ztuhnutí taveniny, obzvlášť pokud má materiál preformy vysoký sklon k odvodu tepla. Jelikož má tavenina poměrně vysoké povrchové napětí, zvlhčovat nebo smáčet preformy by mohlo vyústit k problému, neboť by mohlo docházet k nevyplnění dutin mezi prekursory. Pro zabránění tohoto jevu využíváme vakua, které vytvoříme mezi prekursory preforem a také pomocí lití za zvýšeného tlaku. K tomu se používají vakuové tlakové licí stroje metodou die-casting. Prekursor v podobě granulí nebo kuliček vytváří po odlití kovu do formy porézní strukturu. Takto lze zpracovat širokou škálu kovů, včetně hliníku, hořčíku, zinku, olova, cínu atd. Výhodou celé této metody je možnost ovládání pórovitosti, ale dosahuje se zde oproti ostatním metodám pórovitosti pod 80 % [2], [9], [23].

Na obr. 22 je popsán možný způsob pro výrobu syntaktických pěn. V tomto případě byly použity komerčně dostupné duté kuličky oxidu hlinitého o průměru 2,1 až 3,6 mm a tloušťce stěny 100 až 200 nm [2].



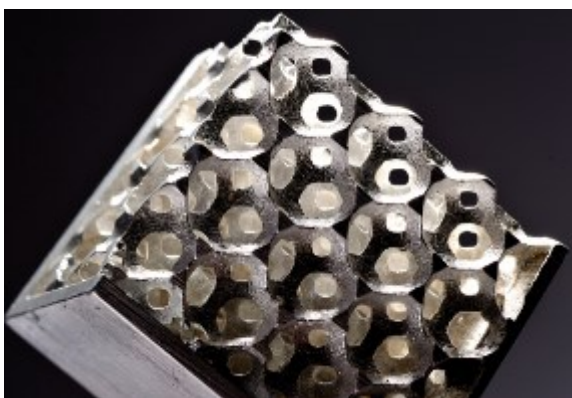
Obr. 22 - Postup výroby syntaktických pěn [2]

Preformy se v současnosti nevyrábějí z jednotlivých kuliček, ale jako celistvé součásti s několika pravidelně uspořádanými buňkami, tvořící pórovitou síť (viz. obr 23). Preforma může být prakticky vzato jakéhokoli tvaru (čtvercového, obdélníkového). Jednotlivé desky preforem jsou na sebe naskládány a tvoří tak v dutině formy složitý tvar jádra. Desky preforem mohou být vyrobeny například z formovacích směsí metodou Cold Box, používanou běžně ve slévárnách na výrobu jader. Takto vyrobená preforma se jednoduše umístí do běžné slévárenské formy jako běžné jádro [14], [20].



Obr. 23 Preforma vyrobená z navrstvených buněk [23]

Metodu lití do preforem používá například společnost Goodfellow Corp., na základě patentu z Centre Technique des Industries de la Fonderie, kteří jsou mezinárodním dodavatelem kovů a materiálů pro výzkum a průmysl, zabývající se výrobou nízkonákladové hliníkové pěny (obr. 24), jejíž vlastnosti splňují požadavek na výměnu tepla, utlumení vibrací a absorpci nárazové energie [8], [9], [22].



Obr. 24 Hliníková pěna od firmy Goodfellow Corp. s pravidelnou strukturou [22]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 OBECNÝ ÚVOD K PRAKTICKÉ ČÁSTI

Jak již bylo zmíněno v teoretické části práce, kovové pěny mají mnoho různorodých vlastností, které jsou pro dané druhy charakteristické. Dělíme je podle typu póru na otevřené a uzavřené, dále podle strukturálního uspořádání na pravidelné a nepravidelné. Na těchto aspektech jsou závislé i metody výroby, obzvlášť slévárenské technologie. Kovové pěny se dají zhotovit z široké škály neželezných kovů, zdaleka nejpoužívanějšími jsou však slitiny hliníku.

Zadáním této práce je výroba odlitků z kovových pěn a studium jejich tepelných vlastností. To znamená, že se praktická část skládala ze dvou úkonů. V první byla cílem tvorba odlitků s pravidelným buněčným uspořádáním. To spočívalo ve výrobě jednorázových forem, kde byla použita formovací směs z jednotné bentonitové a modelové směsi, pomocí modelů z VŠB-TU Ostrava. Do zhotovené formy byly naskládány prekurzory v podobě preforem v různých variantách a následně odlity gravitačním litím. Druhá část se zaměřila na analýzu tepelných přestupů v samostatně navržených a zkonstruovaných modelech. Nejprve byly vytvořeny geometrické modely, které se následně nechaly podrobit simulačním procesům. Poté byly vyhodnoceny výsledky simulací. Snahou bylo navrhnout co nejefektivnější tepelný výměník.

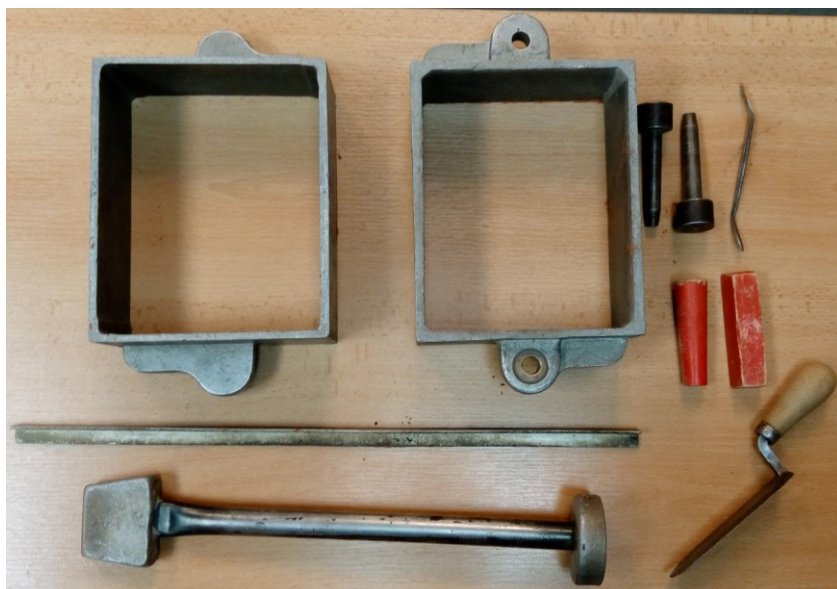
4 VÝROBA ODLITKŮ

Jak jsem již zmínil výše, podstatou práce byla výroba odlitků z hliníkové kovové pěny metodou lití kovu do dutiny formy vyplněné preformami. Preformy byly složeny z prekurzorů, což jsou nespalitelné kuličky zhotoveny technologií Cold Box. Hlavní výhodou této technologie je vytvoření pravidelné buněčné struktury.

Takto vyrobená kovová pěna umožňuje proudit kapalinám a plynům jejich strukturou, a proto jsou vhodné pro konstruování výměníků tepla. Další výhoda, kterou bych zmínil, se týká absorpce energie, což je vlastnost hlavně využívána v automobilovém průmyslu.

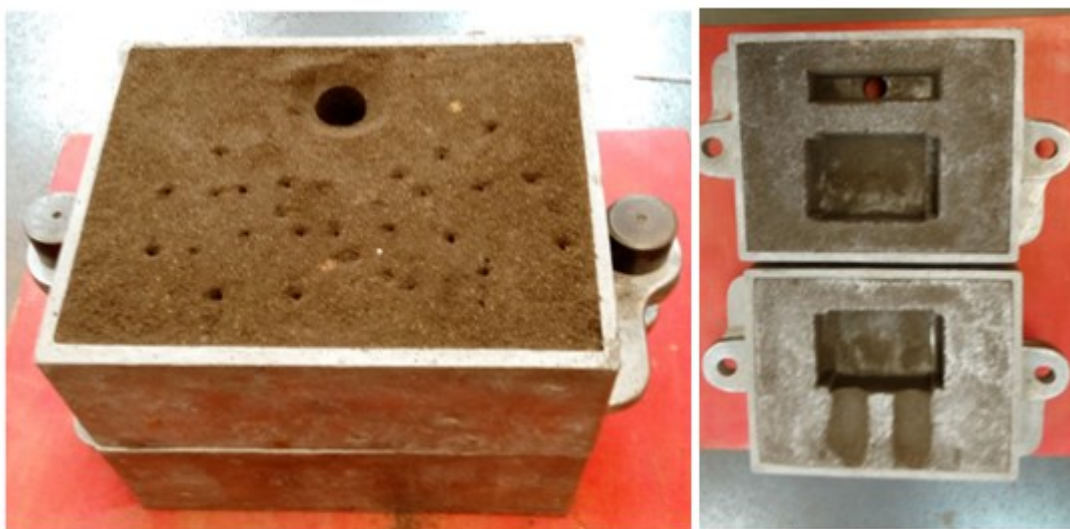
4.1 Pracovní postup a formování

Formování probíhalo v laboratořích katedry Metalurgie a slévárenství VŠB-TU Ostrava. Jako výplňová směs byla použita jednak jednotná bentonitová směs a dále také modelová směs s výrobním označením Bentomix T. Ostřivo bylo křemenný písek z lokality Grudzeń Las s obchodním označením GL 27, vysokou chemickou čistotou ($\text{SiO}_2 = 99,612$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,099$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,039$; $\text{TiO}_2 = 0,050$), kulatým zrnem a teplotou spékání až nad 1600°C . Toto ostřivo je vhodné pro široké použití a zabezpečuje kvalitní povrch odlitků jak železných, tak i neželezných slitin.



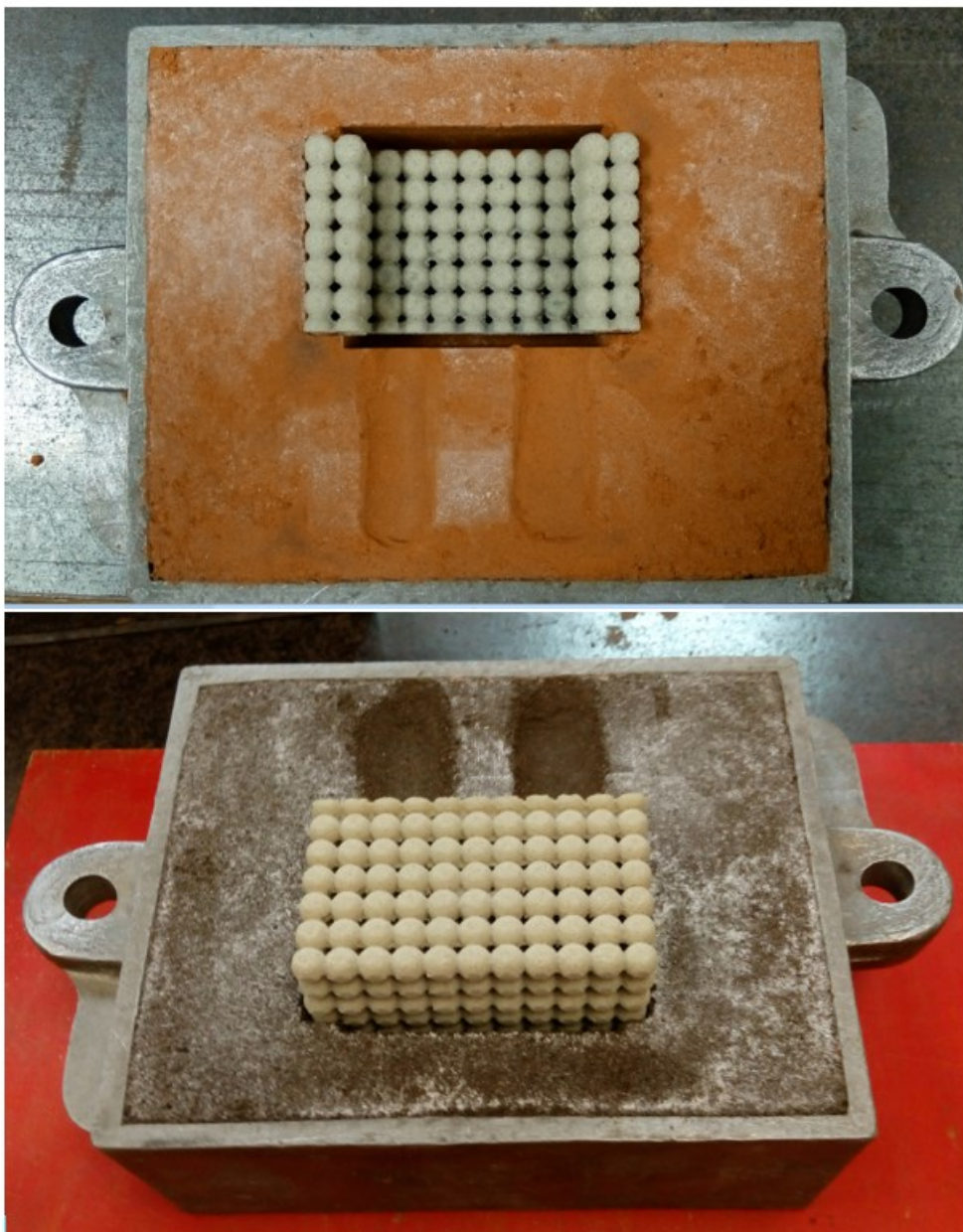
Obr. 25 Formovací nářadí

Formovací model byl rovněž poskytnut katedrou Metalurgie a slévárenství VŠB-TU Ostrava. Z toho důvodu nebyl nutný složitý proces návrhu a výroby modelu, často vytvářený technologiemi Rapid Prototyping. Nejdříve byla zaformována spodní polovina rámu, díky čemuž bylo možné určit dělicí rovinu a následně doformovat horní část rámu s rozváděcím kanálkem a licím kulem. Po dopěchování a vyhlazení povrchu hladítkem byla vytvořena licí jamka pomocí lanzet, odděleny obě části rámu od sebe, opatrně vyjmut licí kůl a část modelu z horního rámu, který označoval umístění preforem. Následně byly zhotoveny zářezy na dolním rámu směrem od rozváděcího kanálku k dutině formy a rovněž opatrně vyjmuta druhá část modelu. Pro lepší prodyšnost směsi byly vytvořeny průduchy i výfuky a následně zahlazeny všechny nerovnosti (viz obr. 26).



Obr. 26 Hotová forma připravená k odlévání – vlevo / horní a spodní zaformovaný rám z JBS – vpravo

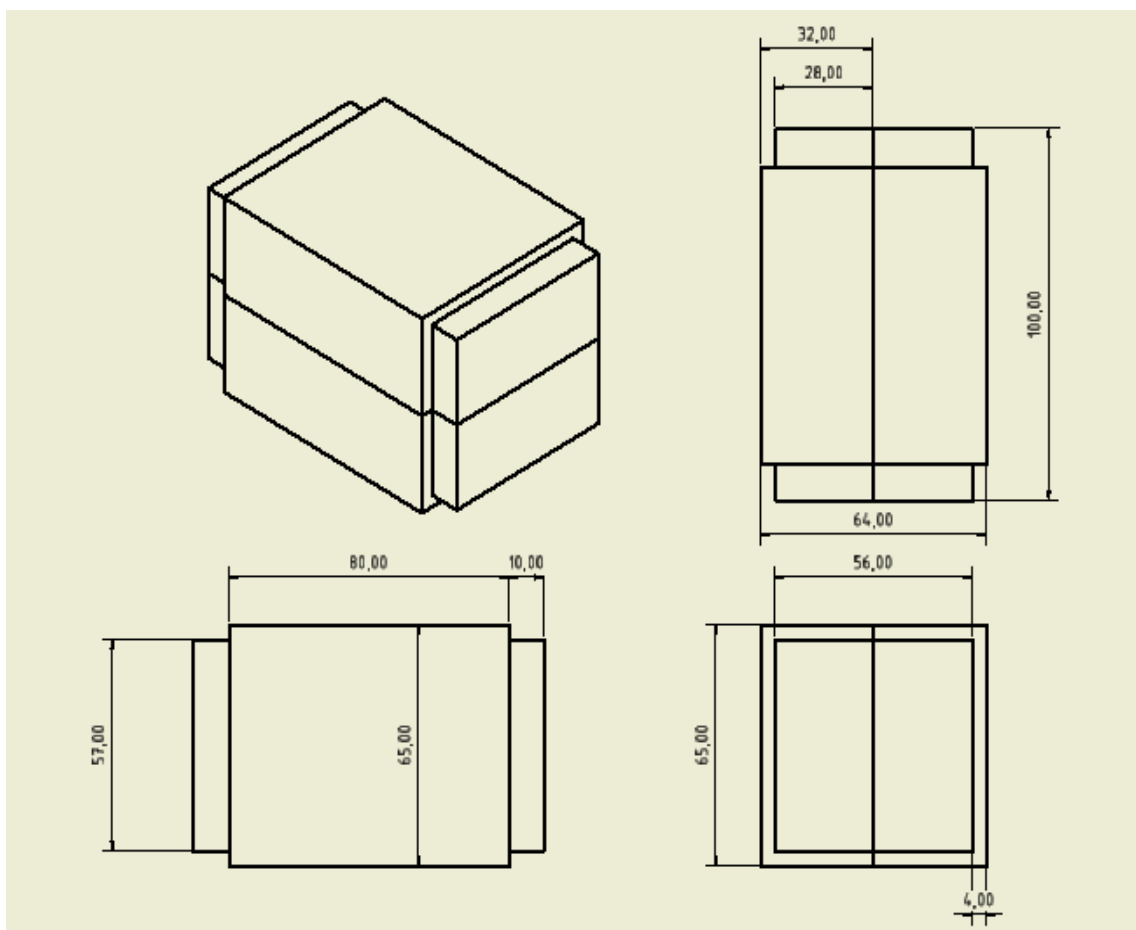
Nejdůležitějším a zároveň nejobtížnějším faktorem tohoto snažení bylo přesné vložení preforem do modelu, aniž by došlo k deformaci formy (viz obr. 27). Toho bylo dosaženo díky známkám na modelu. Preformy byly na sebe pokládány v různých kombinacích a upevněny hřebíky z důvodu působícího metalostatického tlaku při lití, který mohl způsobit pohnutí jádra a nevytvoření celistvé struktury. Koncovým bodem tohoto procesu bylo složení obou polovin rámu tak, aby nebyly preformy nijak poškozeny a zajištěny kolíky.



Obr. 27 Varianty uložení preforem do dutiny formy

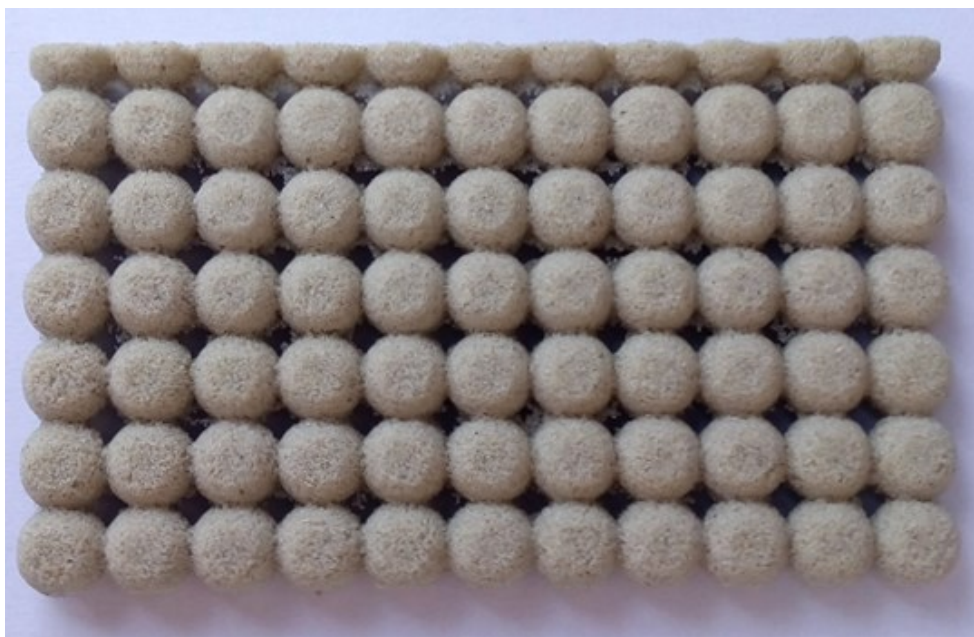
4.1.1 Model a preforma

Pro výrobu formy byl použit model poskytnutý VŠB-TU Ostrava, katedrou Metalurgie a slévárenství (obr. 28 a 29). Tento model tedy sloužil k vytvoření dutiny ve formě a byl opatřen známkami. Jejich funkce spočívala v pečlivém vyrovnání preforem v dutině formy a zabezpečení přesnosti a kvality odlitků. Model měl rozměry 100x65x64 mm, skládal se ze dvou polovin, které na sebe přesně pasovaly a zároveň tvořily dělicí rovinu formy.



Obr. 28 Výkres modelu

Jako jádra byly použity preformy, což jsou desky obdélníkového tvaru o rozměrech cca 96x57x9 mm, složeny z prekurzorů (obr. 29). Jádra – preformy byly vyráběné ve Slévárně a modelárně Nové Ransko s.r.o., která používá technologii vstřelování směsi do studeného jaderníku – PUR Cold Box. Výhodou těchto materiálů je primárně nenasákavost, pevnost a snadnost jejich odstranění po odlití. Aby se dosáhlo spojení formovací směsi v uzlech buněk, jsou jednotlivé koule zploštělé na kontaktních plochách. Tím je dosaženo alespoň částečné pevnosti, aby při obsluze nedošlo k porušení celistvosti prekurzoru. Celé jádro se vytvořilo navrstvením šestice preforem.



Obr. 29 Ukázka preformy

4.1.2 Tavení a odlévání

Jako vsázkový materiál pro tavbu byla použita hliníková slitina, konkrétně mírně podeutektický silumin AlSi10 (obr. 30). Tato slitina má poměrně vysokou pevnost, nízkou hustotu, je snadno obrobitelná, tvářitelná, a hlavně se vyznačuje dobrou zabíhavostí. Obsah křemíku ve slitině je 10 %. Slitina vytváří hustou strukturu a nemá sklon k tvorbě mikro staženin. Disponuje rovněž velmi malou objemovou změnou při tuhnutí a velmi nízkým sklonem k tvorbě trhlin.



Obr. 30 Vsázkový materiál AlSi10

Tavba probíhala pod odborným dozorem vědeckých pracovníků katedry Metalurgie a slévárenství, za asistence diplomanta. Ohřev materiálu se uskutečňoval v elektrické odporové peci od výrobce LAC, typ 80/13 o maximálním výkonu 13 kW. Pec je schopna dosáhnout teploty až 1300 °C (obr. 31).

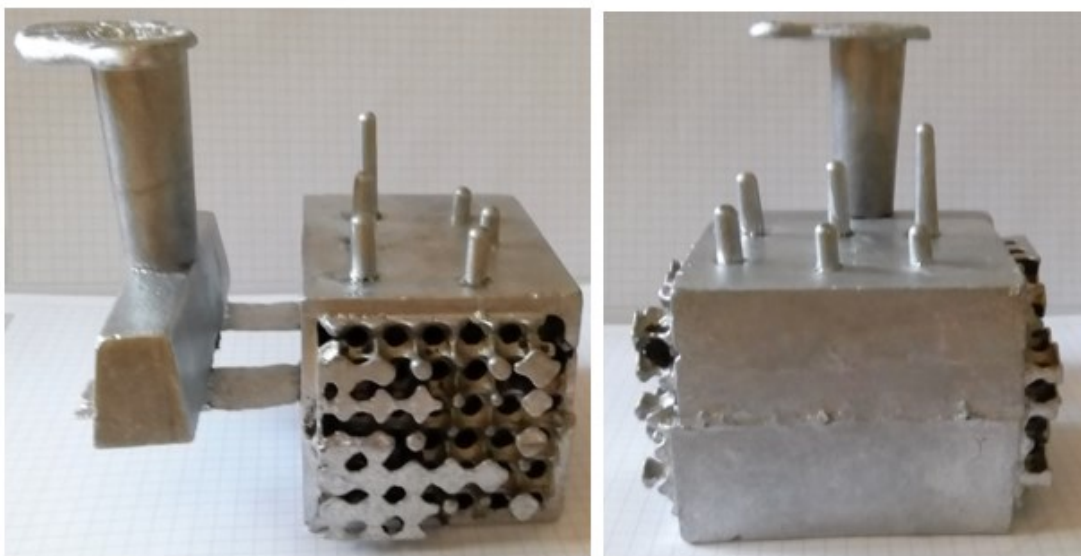


Obr. 31 Elektrická odporová pec LAC

Po několika experimentálních měřeních bylo ověřeno, že silumin dosahuje neoptimálnější zabíhavosti při teplotě okolo 730 °C. U této teploty se dobře plnila celá dutina formy a nedocházelo k naplynění taveniny. Na této teplotě bylo odlito deset odlitků. Při odlévání byl nejprve materiál přehřát nad požadovanou teplotu, poté opatrně vyjmut z pece, řádně zbaven oxidických blan z povrchu taveniny. Následně se nechala tavenina chladnout na požadovanou teplotu a byla měřena termočlánkem. Při dosažení optimální teploty probíhalo lití. Díky tomu byly odlitky celistvé a neobsahovaly žádné studené spoje. Vyšší teplota má vliv na mírném snížení mechanických vlastností odlitku.

4.1.3 Odstranění vtokové soustavy, čištění a povrchová úprava

Po ztuhnutí a dostatečném vychladnutí byly oba rámy formy odděleny a odlitek vyjmut. Proběhla vizuální kontrola odlitku, zhodnocení a konzultace dosažených výsledků s vedoucími. Následně probíhalo čištění odlitku, tzn. odstranění zbylého jádra (prekurzorů) z odlitků. Nejjednodušší způsob se ukázal také nejefektivnějším, a to tak, že byly jednotlivé dutiny odlitku provrtávány z obou stran, dokud nebyl odlitek zcela zbaven prekurzorů. Další stádium znamenalo přípravu odlitků na obrábění. Byly odřezány výfuky z horní strany odlitků a také vtoková soustava z boku odlitků (obr. 32).



Obr. 32 Očištěný odlitek před odřezáním vtokové soustavy

4.1.4 Analýza dosažených výsledků

Základem odlévání bylo zjistit neoptimálnější teplotu, aby kov co nejlépe zabíhal. Nejvyšší zkoumaná teplota byla 773 °C, nicméně po několika experimentech byla vyhodnocena teplota okolo 735 °C za optimální (viz tabulka 1). Na této teplotě proběhlo 10 odlévání. Účelem bylo získat odlitky jak s plnou, tak i se zcela dutou stěnou (viz obr. 33 a 34). Celkem bylo zhotoveno 13 zkušebních odlitků. Prvních šest odlitků bylo odlito do formy s jednotnou bentonitovou směsí, což vedlo k řadě problémů hlavně z kvalitativní stránky. Objevovaly se hlavně povrchové vady. Proto se od tohoto typu formovací směsi ustoupilo a jednotná bentonitová směs byla nahrazena modelovou směsí Bentomix T. Výsledné odlitky lité do této formovací směsi byly na mnohem vyšší úrovni a také práce vynaložená na tvorbu zářezů či vtokové jamky byla jednodušší. Mezi nevýhody, které bych zmínil, patří větší fyzická náročnost při formování a značně vyšší pořizovací náklady než u jednotné bentonitové směsi.

Tabulka 1 Teploty lití jednotlivých vzorků odlitků

Číslo vzorku	Teplota lití [°C]
1.	773
2.	700
3.	720
4.	725
5.	732
6.	730
7.	735
8.	733
9.	735
10.	735
11.	735
12.	735
13.	735



Obr. 33 Ukázky odlitků s plnou stěnou po obrobení



Obr. 34 Ukázky odlitků s dutou stěnou po obrobení

5 STUDIUM TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ KOVOVÝCH PĚN

Druhou sekcí praktické části byla simulační analýza tepelných vlastností kovových pěn. Podstatou tohoto snažení byly tepelné simulace zhotovených modelů v programu Ansys 18, které by měly fungovat na principu výměníku tepla. Nejdříve bylo nutné vytvořit geometrické návrhy a následně je podrobit zmíněným tepelným simulacím. Bylo vymodelováno celkem devět návrhů. Tři varianty preforem a k tomu vždy tři stejné kombinace uspořádání, aby se mohly výsledné simulace mezi sebou porovnávat (viz tabulka 2).

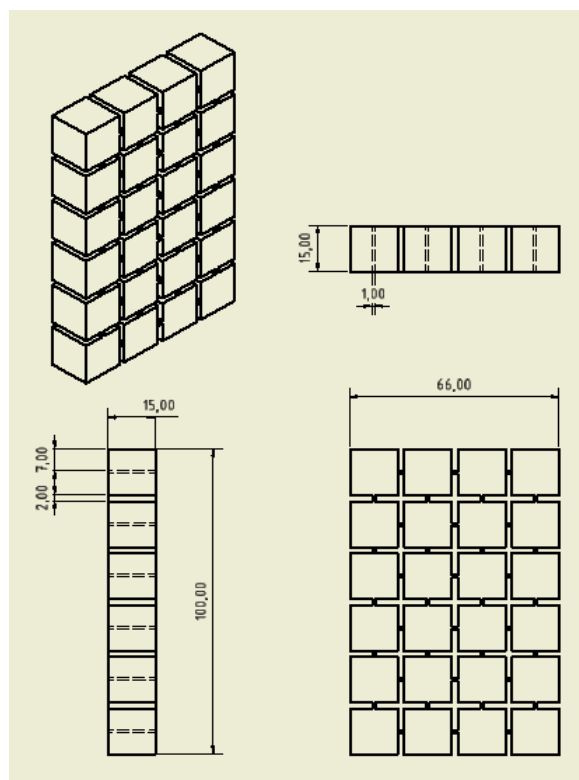
Tabulka 2 Zkoumané geometrie

Číslo geometrie	Název geometrie	Průřez
1.	Tři preformy na sobě s mezerou	Kvádr
2.		Šestiúhelník
3.		Čtverec
4.	Čtyři preformy na sobě	Kvádr
5.		Šestiúhelník
6.		Čtverec
7.	Dvě a dvě preformy na sobě s mezerou	Kvádr
8.		Šestiúhelník
9.		Čtverec

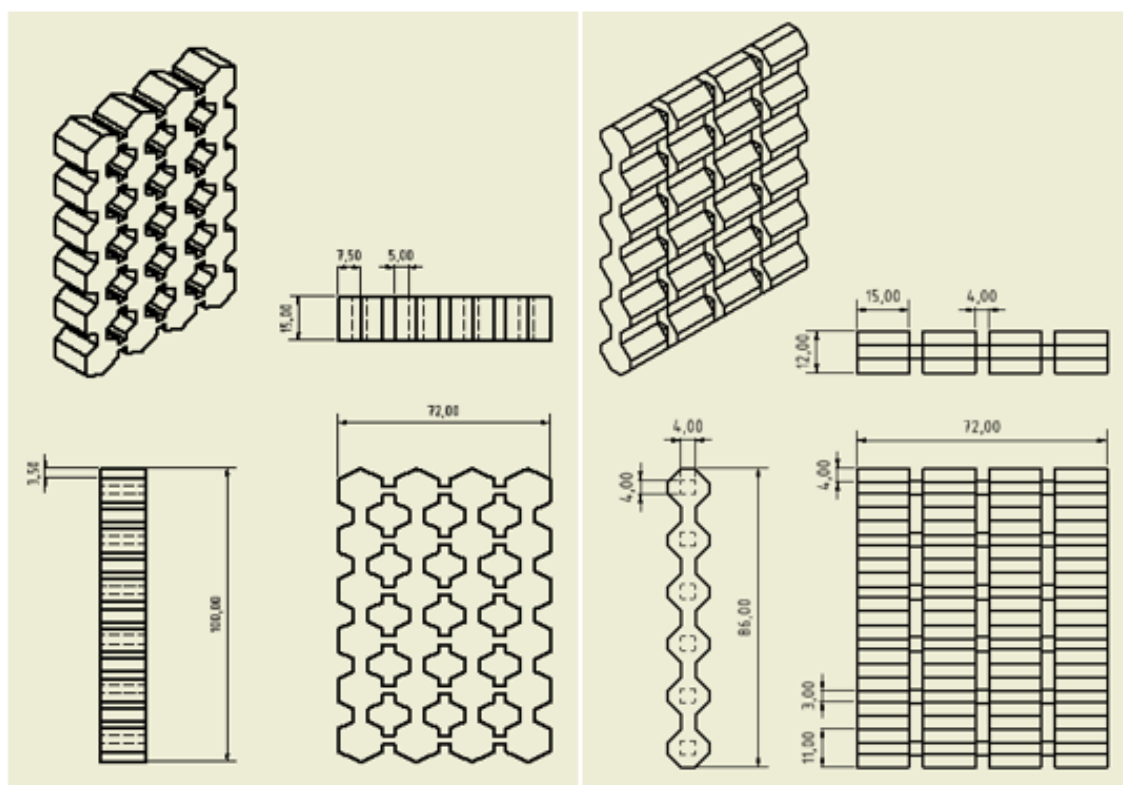
5.1 Návrh modelu

Základem tohoto úkolu bylo vytvoření modelu pro simulace. Tvorba probíhala v programu Autodesk Inventor 2018 Professional, což je parametrický vývojářský systém pro konstruování ve 3D. Při modelování jsem se inspiroval vzhledem preforem dodané VŠB-TU Ostrava.

Prvním krokem konstruování bylo vytvoření preformy. Základními tvary byly čtverce, lichoběžníky a kvádry (obr. 35 a 36). Ty byly následně upraveny do takového tvaru, aby je v budoucnu bylo eventuálně možné vyrobit (např. useknutí hran kvádrů).

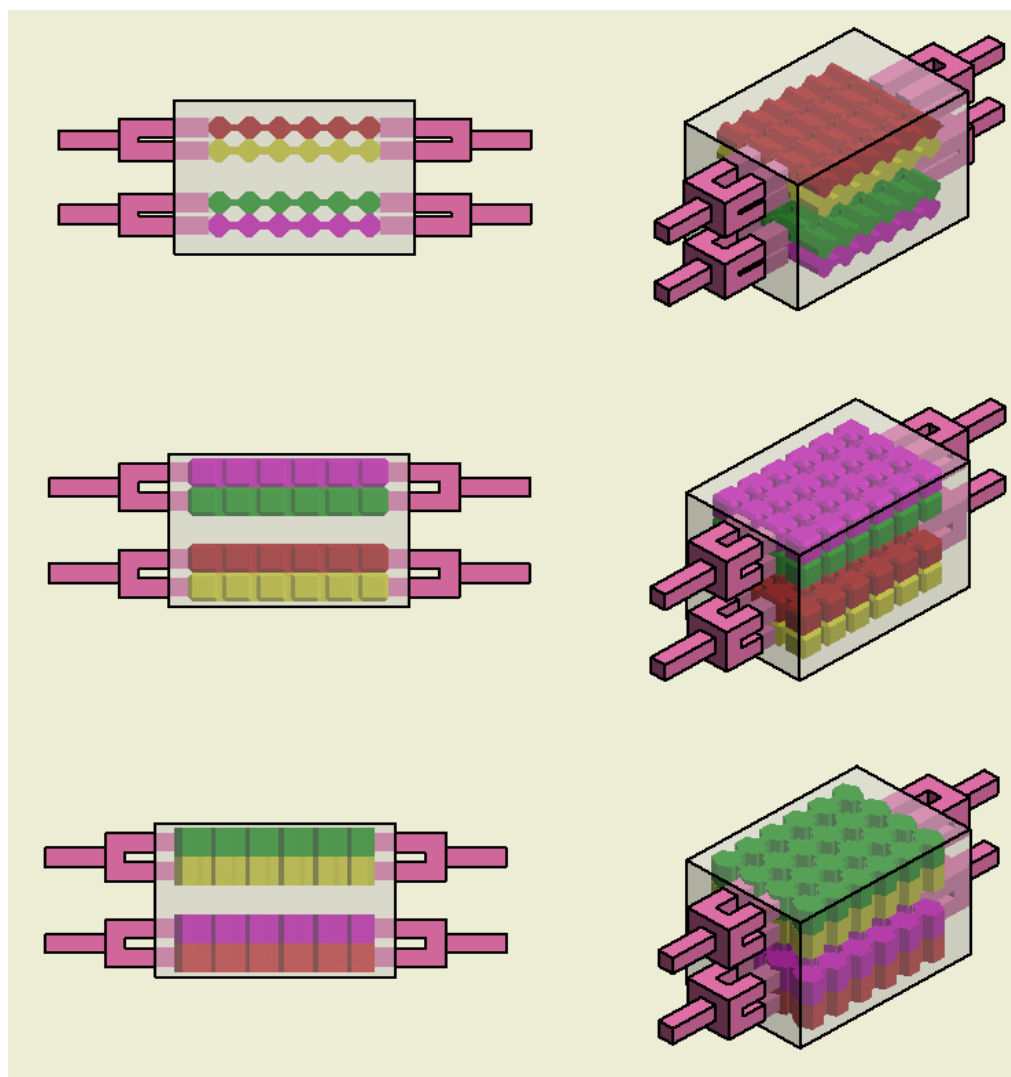


Obr. 35 Preforma čtvercového tvaru

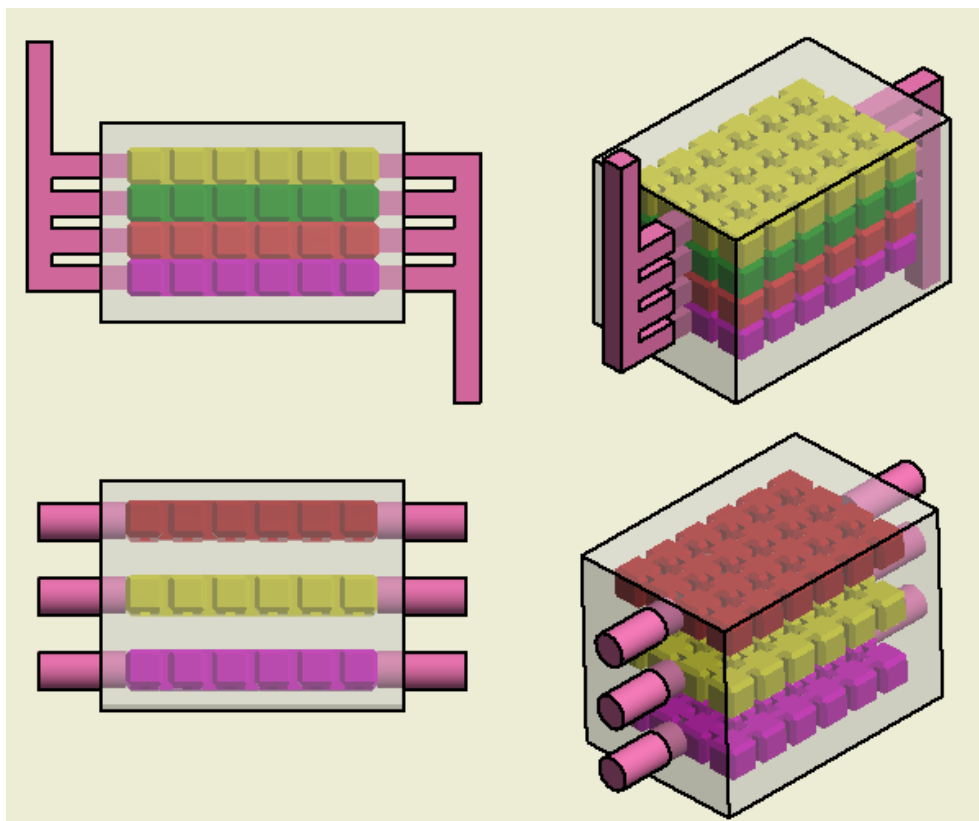


Obr. 36 Vlevo preforma šestiúhelníkového tvaru a vpravo ve tvaru kvádru

Modelování probíhalo v několika stádiích. Z počátku bylo třeba vytvořit celkový koncept a poté jej proměnit ve skutečnost. Začal jsem základním náčrtem a poté postupoval dál za využití základních konstrukčních operací, jako jsou např. vysunutí, rotace, děrování apod. Následovalo použití logických operací, jakou jsou zkosení či zaoblení. Každý návrh se skládal ze tří součástí – z preforem, hotového odlitku a vtoků. Ty byly na sebe navázány funkcí vazby. Preformy byly v odlitku skládány ve třech stejných kombinacích – čtyři na sebe, dvě na sebe s mezerou velikosti jedné preformy a tři s mezerou mezi sebou 15 mm (obr. 37 a 38). Posledním úkonem bylo vyřezání preforem do hotového odlitku. Každá ze tří preforem měla mírně odlišné rozměry, ale velikosti jednotlivých prekurzorů jsem sjednotil na 15 mm. Všechny odlitky byly obdélníkového tvaru a měly stejné rozměry, a to 120x80x80 mm. Vtoky byly buď čtvercových, nebo kruhových průřezů.



Obr. 37 Ukázka všech tří tvarových variant se dvěma preformami na sobě s mezerou



Obr. 38 Ukázky dalších simulovaných kombinací preforem

5.2 Simulační procesy proudění

Simulace probíhaly za využití programu ANSYS 18, což je software nabízející ucelenou řadu produktů pro různé typy analýz. Poskytuje tak přístup prakticky k jakékoli oblasti inženýrské simulace. Uživatel velice jednoduše propojuje různé analýzy bez nutnosti nákupu dalších specializovaných programů. Prostředí ANSYS Workbench umožňuje nejen snadné propojení jednotlivých typů analýz, ale nabízí nástroje, které jsou pro různé analýzy společné. Uživatel tak používá program ANSYS DesignModeler používaný k přípravě nebo úpravě geometrie. Tato geometrie je pak automaticky načtena do programu ANSYS Meshing, kde se provádí síťování. Z tohoto programu je možné síť exportovat do CFX řešiče, kde je možno simulovat proudění. Výsledky se generují v programu FCD-Post.

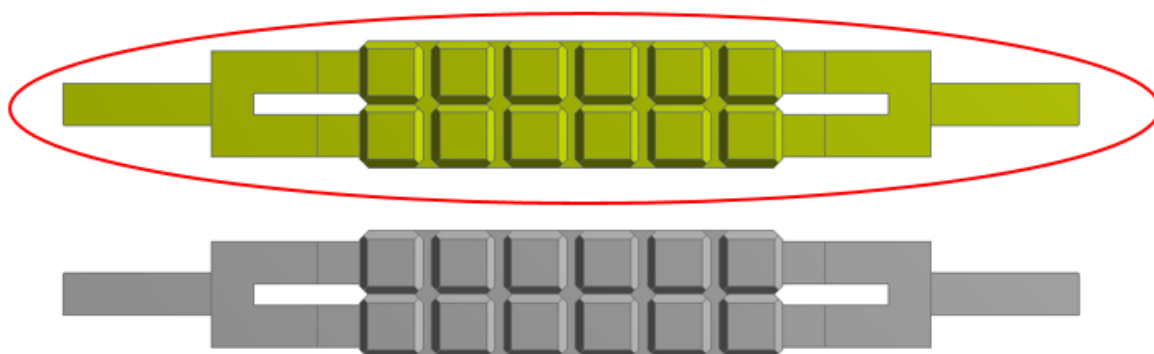
5.2.1 Parametry simulací

Vytvořený návrh modelu v Autodesk Inventor 2018 byl exportován do ANSYS Workbench. Dalším krokem byla úprava geometrie v programu DesignModeler. Zde bylo třeba nastavit funkcí Projection ohraničení přívodu a odvodu proudění (viz obr. 39).



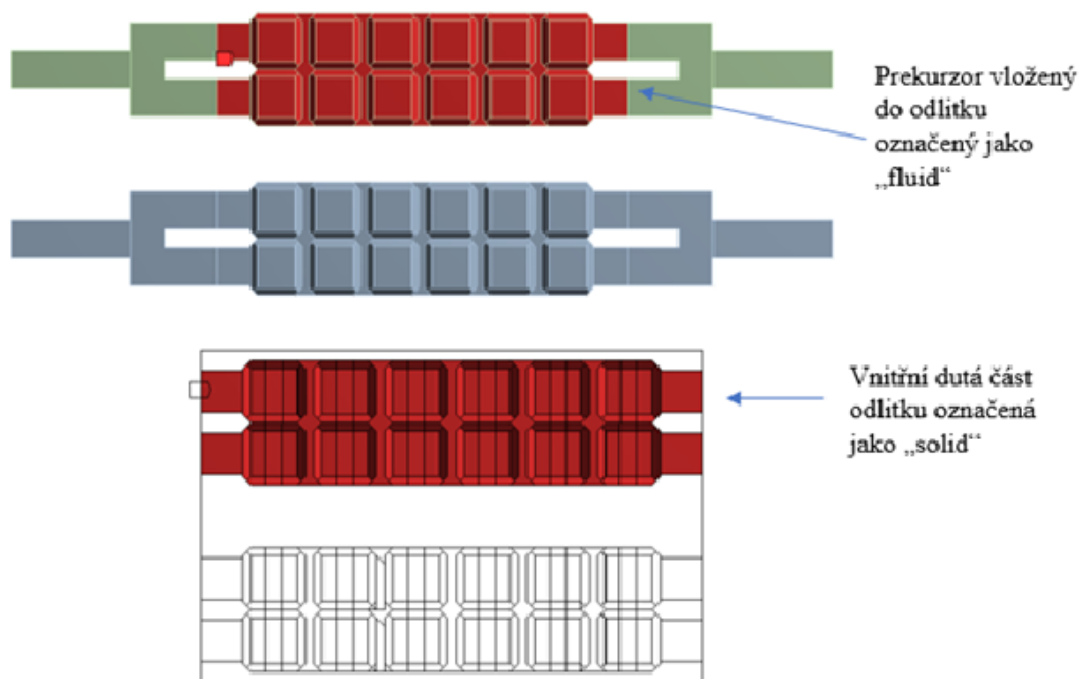
Obr. 39 Zelené čáry značí místo pro ohraničení

Dále bylo třeba sjednotit jednotlivé preformy, protože jak je zmíněno výše, všechny byly modelovány a vazbeny zvlášť. Program si potřeboval myslet, že jsou dvě preformy a vtoky jednou součástí. Toho bylo docíleno operací Boolean (viz. obr 40).



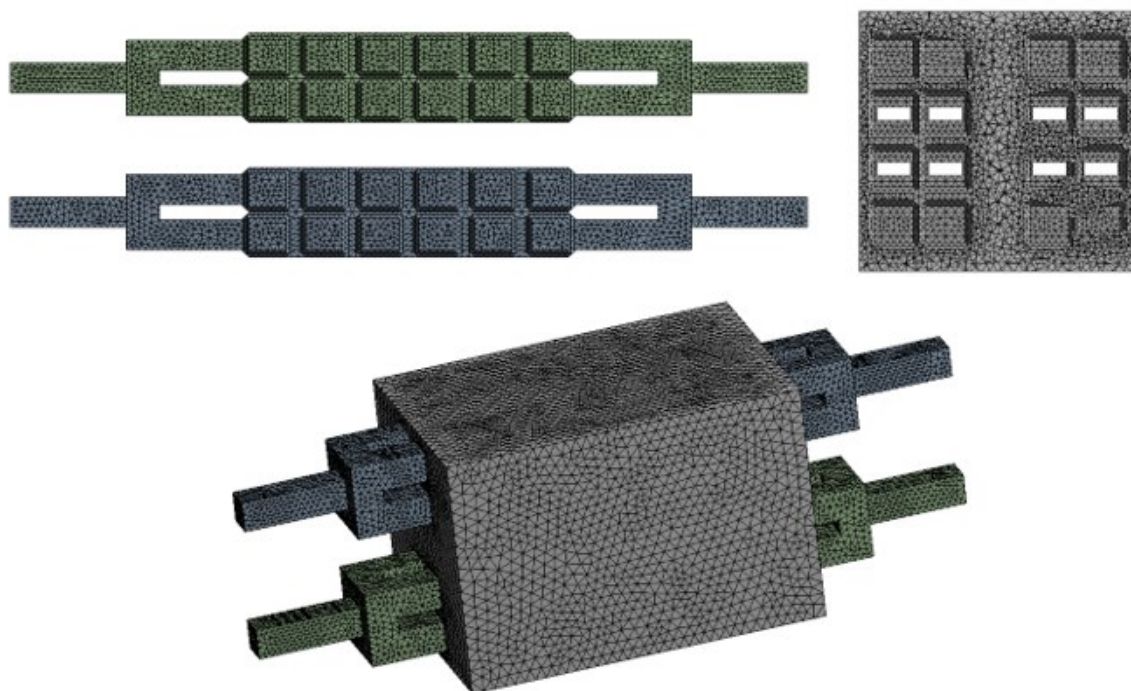
Obr. 40 Zvýrazněna část již sjednocená operací Boolean

Následující operace již probíhaly v programu ANSYS Meshing. Nejdříve bylo nutno označit součásti, které jsou pevný kov a kde bude proudit tekutina. Označila se tedy patřičná oblast a na základě podmínek v panelu Named Selection byla zvolená patřičná varianta, konkrétně buď fluid reprezentující proudící vzduch nebo solid reprezentující výměník (viz obr. 41).



Obr. 41 Ukázka funkce Named selection

Poté bylo třeba nastavit mnoho různých parametrů pro síťování, jako např. body sizing, face sizing, inflection apod. Na základě těchto podmínek bylo možné vygenerovat celou potřebnou síť (viz. obr 42).



Obr. 42 Ukázky vysítěvání jednotlivých částí

5.2.2 Vyhodnocení simulací

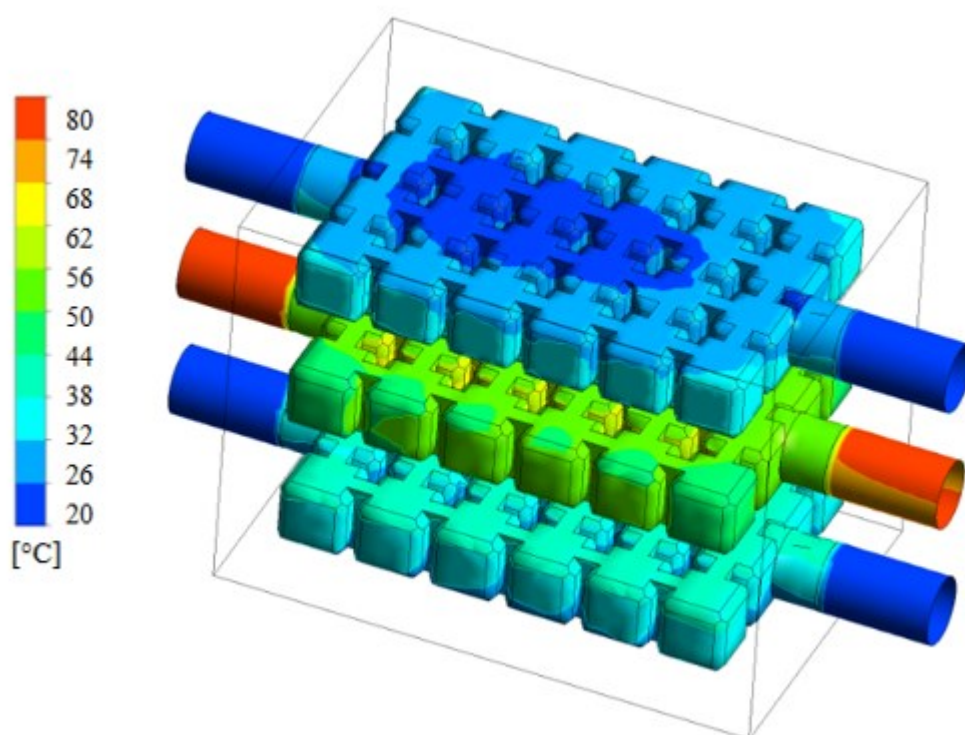
Simulační procesy trvaly dva týdny. Výsledky byly vygenerovány v programu CFD-Post, následně zhodnoceny. Po konzultaci s vedoucím práce byl vybrán návrh s nejlepším výsledkem simulace a podrobně zanalyzován i zdokumentován.

Simulacemi prošlo celkem devět modelů, z toho šest fungovalo na principu výměníku tepla a tři na principu topného tělesa. U modelů s jedním spojeným přívodem a odvodem byla nastavena vstupní teplota na 80 °C. Modely se dvěma vtoky měly pro horní vtok nadefinovanou teplotu 80 °C a pro spodní vtok 20 °C. Poslední varianta, tedy se třemi přívody a odvody simulovala proudění na bočních stranách při teplotě 20 °C a ve středu při teplotě 80 °C (viz tabulka 3).

Tabulka 3 Vstupní a výstupní parametry

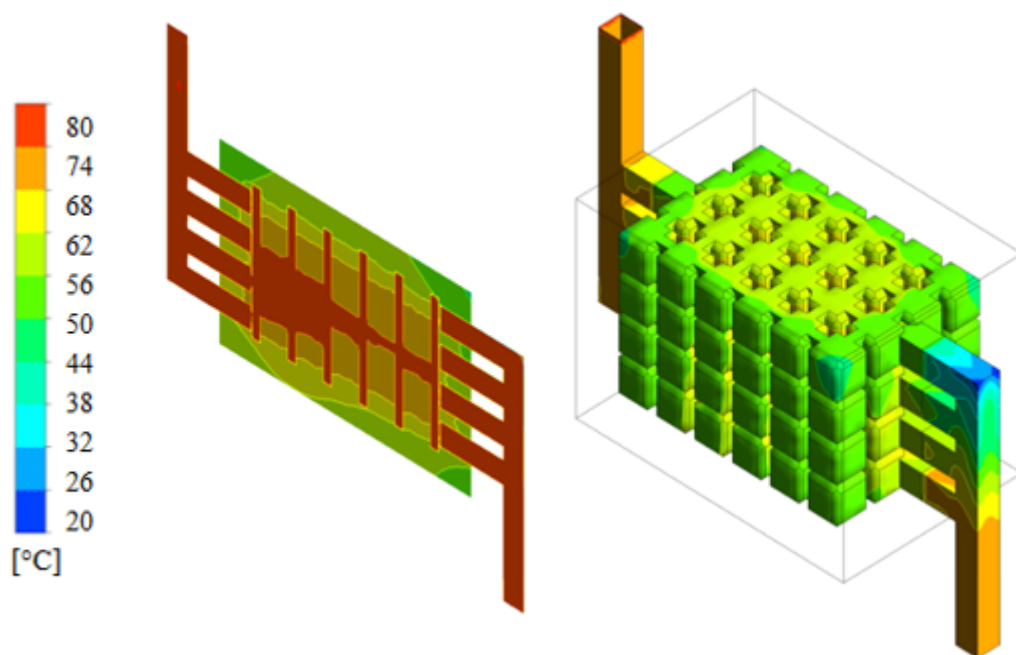
Číslo geometrie	Vstupní teplota [°C]	Výstupní teplota [°C]	Vstupní tlak [Pa]	Výstupní tlak [Pa]
1.	80	75,95	12890	6,624
	20	22,05	12820	8,152
	20	22,05	12970	8,234
2.	80	76,25	1654	7,822
	20	21,95	1667	5,626
	20	21,95	1692	5,206
3.	80	74,95	4567	5,966
	20	22,45	4654	5,314
	20	22,45	4618	6,051
4.	80	79,95	1462	5,274
5.	80	79,95	966	4,422
6.	80	79,95	916,7	4,072
7.	80	70,55	1218	3,869
	20	28,85	1220	3,184
8.	80	68,35	925	6,012
	20	29,95	917,8	5,138
9.	80	62,85	1017	0,8625
	20	36,95	996,5	1,395

Jak je z obr. 43 patrné, v modelu nedošlo téměř k žádnému tepelnému přestupu. Dá se tedy předpokládat, že takto navrhnutý tepelný výměník je naprosto nepoužitelný. Teploty na vstupu a výstupu se odlišovaly jen minimálně, přibližně okolo 5 °C. Je možné, že k zajištění funkčnosti výměníku by mohlo stačit zmenšit prostory mezi jednotlivými preformami. Dále bych doporučil celkové zmenšení celého odlitku, přidání vtoků a modifikace jejich umístění. Je pravděpodobné, že takto velké množství kovu neumožní požadovaný prostup tepla. Velice podobně vypadaly i výsledky simulací s šestiúhelníkovými a trojúhelníkovými preformami.



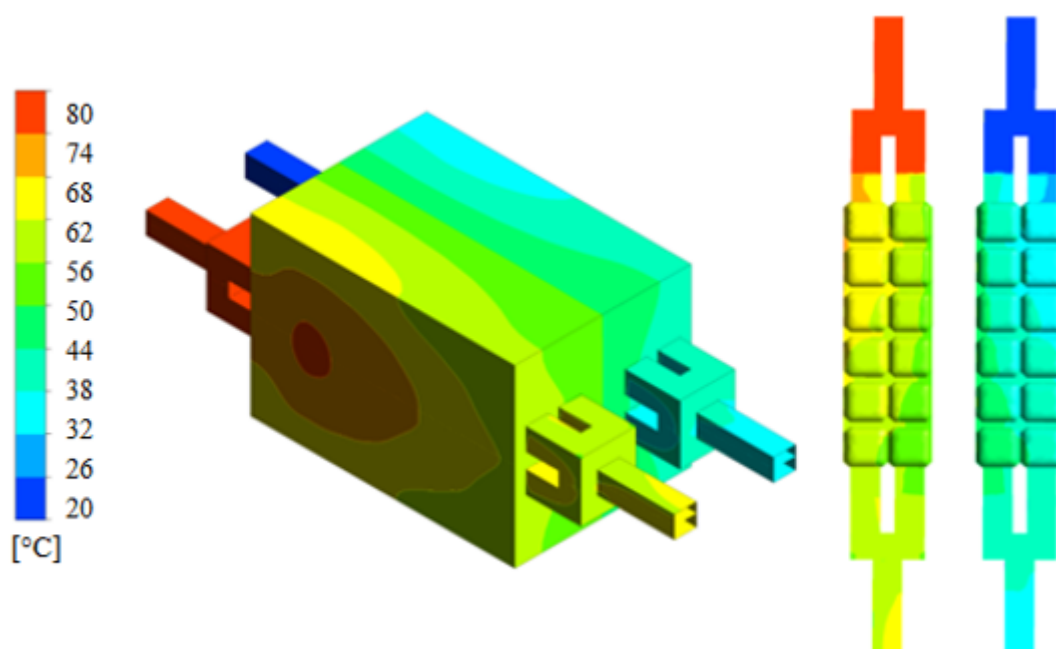
Obr. 43 Ukázka tepelného proudění modelu geometrie č. 3

Na obr. 44 je možné vidět řez a perspektivní pohled na vnitřní část modelu geometrie č. 6. U takto zkonstruovaných návrhů není možné najít využití v tepelných výměnících, protože zde ani tak nedochází k výměně tepla, jako spíše k tepelné výdrži. Ze simulace je zjevné, že tepelné proudění probíhalo v stejných částech velmi podobně. Rozdíl mezi vstupem a výstupem byl menší než 1 °C. Z hlediska funkčnosti a použitelnosti by takto navržený model mohl najít v uplatnění v oblasti topných těles, radiátorů apod. Nicméně bych určitě toto řešení aplikoval u výroby z jiného materiálu, například z litiny.



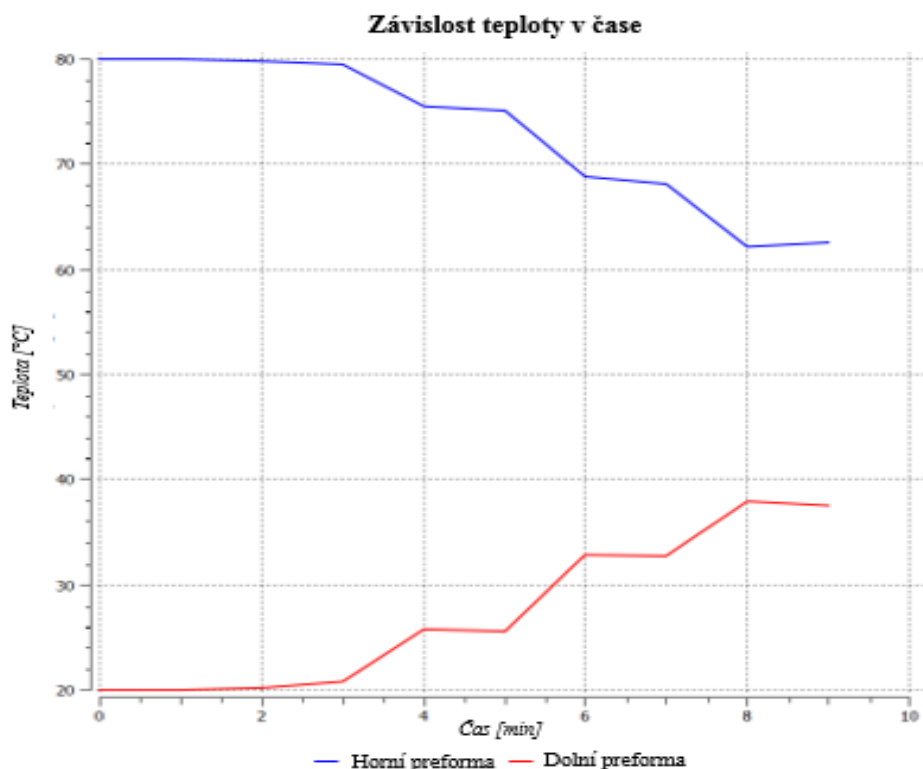
Obr. 44 Ukázky přestupu tepla u modelu s geometrií č. 6

Z výsledků simulací bylo patrné, že jediná geometrie, která by mohla najít uplatnění v praxi, byly modely s dvěma preformami na sobě oddělené mezerou od dalších dvou preforem (geometrie č. 7, 8, 9). Pro analýzu byl použit model s čtvercovým tvarem preforem (geometrie č. 9), protože vykazoval neoptimálnější simulační výsledky. Ten se svým tepelným chováním nejvíce blížil specifickým vlastnostem tepelných výměníků (viz. obr. 45).



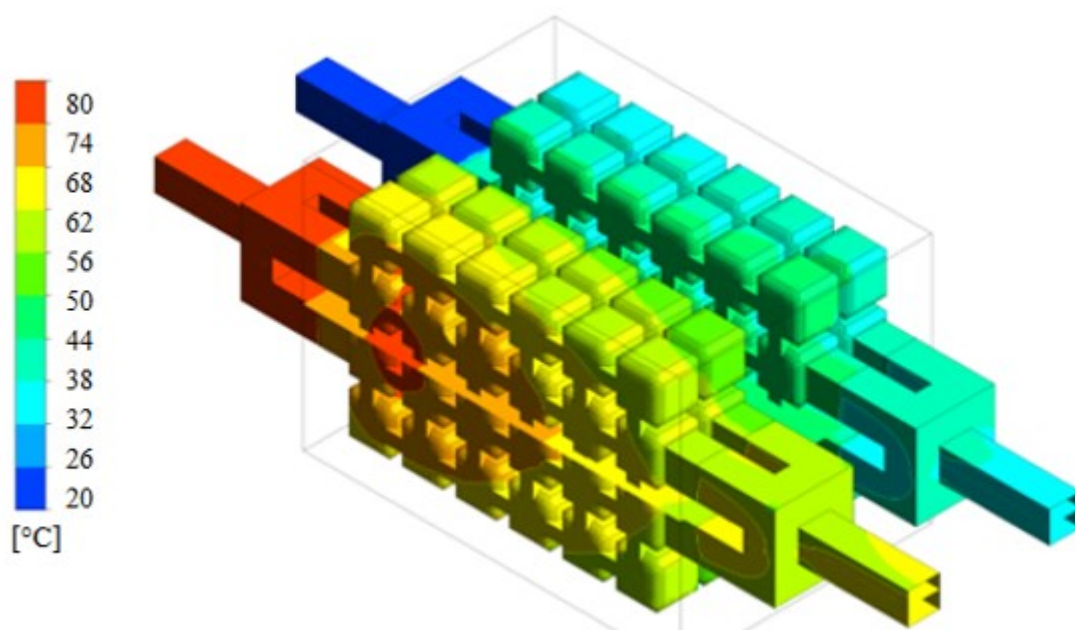
Obr. 45 Ukázka proudění tepla na celém modelu a na bočních stěnách preforem

Simulace dvou deskových preforem byla nastavena tak, že na horní části byla nastavena vstupní teplota na 80 °C a na dolní 20 °C. Z grafu na obr. 46 lze vyčíst, jak se tepelné proudění v takto navrženém modelu chovalo. Během simulačního procesu klesla teplota horní desky na 62,85 °C a dolní desky stoupla na 36,95 °C. To znamená, že se teplota u jedné zkoumané části na výstupu snížila o 17,15 °C a u druhé zvýšila o 16,95 °C. To je téměř ekvivalentní výsledek, z čehož lze usoudit, že takovéto řešení by mohlo najít praktické využití.



Obr. 46 Graf tepelné závislosti modelu

Tepelné proudění probíhalo konstantně a ani 15 mm mezera mezi deskami preforem nezamezila přestupu tepla z jedné strany modelu na druhou. Je možné, kdyby například byla mezera mezi deskami zmenšena na polovinu, přestup tepla by byl ještě efektivnější. Totéž platí pro zmenšení celého objemu odlitku. Nicméně i tak lze dobře pozorovat, jak dochází k proudění tepla – horní strana ohřívá spodní a zároveň spodní ochlazuje horní stranu. Současně lze vidět ochlazování okolním prostředím celý odlitek, protože pro všechny simulace byla nastavena okolní atmosféra na 20 °C. Také jsou zřetelně vidět víry proudu a následné rychlé chladnutí (viz obr. 47).



Obr. 47 Pohled z perspektivy na prostup tepla v preformách a vtocích

ZÁVĚR

Porézní kovy a kovové pěny jsou v současné době v centru aktivního výzkumu a vývojových aktivit. Existuje okolo 150 institucí po celém světě, které pracují s kovovými pěny a většina z nich se zaměřuje na jejich výrobu a charakteristiku. Různé společnosti vyvíjejí a vyrábějí tyto materiály, které jsou používány v řadě průmyslových aplikací, jako jsou lehké konstrukce, biomedicínské implantáty, filtry, elektrody, katalyzátory a výměníky tepla.

Volba materiálové struktury je obecně založena na konečné aplikaci materiálu. Materiály s uzavřenými buňkami poskytují dobré mechanické vlastnosti, ale neumožňují přístup do jejich vnitřního povrchu. Proto se většinou používají v konstrukčních, nosných aplikacích. Tudíž pro funkce spojené s vnitřní částí materiálu je vyžadována tzv. otevřená pórovitost materiálu. Proto se pěny s otevřenými buňkami většinou používají ve funkčních aplikacích, kde nosná schopnost není primárním cílem.

Většina nedávných aktivit výzkumu a vývoje týkající se kovových pěn se soustředila na vývoj pěn na bázi hliníku. Hlavně proto, že teplota tavení hliníku je nízká, zpracování jednoduché a hliníkové pěny poskytují, i přes svou nízkou hmotnost, příznivé mechanické vlastnosti. Snaha vyvinout pěny s jinými kovy přesto probíhá, včetně oceli, superplastického zinku, hořčíku, a dokonce těžkých prvků, jako je zlato.

Kovové pěny mohou být vyráběny mnoha různými způsoby, jak je popsáno v teoretické části. Ve většině případů se kovová tavenina stabilizuje nekovovými částicemi, zpění plynem a ztuhne. Plynové bubliny se vytváří vstřikováním plynu nebo rozkladem chemického zpěňovadla v tavenině. Tyto bubliny se neslučují nebo nepraskají kvůli přítomnosti stabilizujících částic. Hlavní oblasti výzkumu a vývoje jsou v současné době zaměřeny na zkoumání pěnových a stabilizačních mechanismů, vývoj nových zpěňovadel, optimalizaci výrobních procesů a snížení výrobních nákladů.

Dalšími technologiemi jsou metody slévárenské. V současnosti zažívá největší rozmach metoda Lost Foam. Základem je odpařitelný model, který je zhotoven většinou z expandovaného polystyrenu. Ten se vyrábí ve zpěňovací formě, poté je opatřen ochranným nátěrem a následně zapěchován do suchého křemenného písku.

Mezi slévárenské technologie také patří metoda odlití kovu do dutiny formy vyplněné preformami. Preformy jsou desky, většinou obdélníkového tvaru, tvořeny kuličkami (prekurzory) a slouží jako jádra. Tento výrobní způsob byl jedním ze dvou témat, kterým jsem

se zabýval v praktické části. Nejdříve probíhalo formování a následně jsem preformy skládal na sebe ve dvou variantách. Poté probíhalo odlévání. Snahou bylo dosažení pravidelného uspořádání buněk výsledných odlitků s plnou a dutou stěnou. Z technologického hlediska bylo zpočátku experimentálního zkoumání nutné nalézt neoptimálnější teplotu kovu, aby co nejlépe zabíhal. Ta byla po několika testovacích odléváních stanovena na 735 °C. Výsledné odlitky na této teplotě byly z kvalitativní stránky v pořádku a taktéž nedocházelo k tvorbě plynových vad. Důležitým aspektem, který je rovněž třeba zmínit, je rozpadavost prekurzorů. Například u průmyslové výroby, kde je co nejvíce kladen důraz na ekonomické úspory, je čím dál více požadovaná nejméně možná zbytková pevnost jádra, aby jeho odstranění a celkové očištění odlitku bylo co nejsnadnější a nejrychlejší. V mém případě nepomohly ani vibrační zkoušky, a proto jsem musel všechny zbylé prekurzory pracně provrtávat. Tato technologie výroby kovových pěn je velice rozsáhlou problematikou a určitě si zaslouží ještě další výzkum.

Druhým tématem, kterému jsem se věnoval v praktické části, bylo studium tepelných vlastností kovových pěn. Cílem bylo zreprodukovat chování tepelných výměníků. Pracovní postup zahrnoval navrhnutí i vytvoření zkoumaných subjektů a následně je podrobit simulačním procesům. Simulováno bylo devět geometrických variant. V šesti případech nebyly výsledky simulací kladné. Některé se svým chováním podobaly topným tělesům, nejspíše z důvodu jednoho přívodu o stejné teplotě. U dalších nedocházelo k požadovanému přestupu tepla, což bylo pravděpodobně dáno velkými mezerami mezi deskami preforem. Pro zlepšení funkce bych doporučil jednak zmenšení prostoru mezi preformami, a hlavně upravení přívodů, například jejich přidání. Jako úspěšné byly zhodnoceny pouze tři výsledky, u nichž byly zcela napodobeny specifické vlastnosti výměníku tepla (geometrie č. 7, 8, 9). Model byl navržen tak, že dvě preformy položené na sebe byly odděleny od dvou dalších mezerou o délce 15 mm. Na horní straně byl zvolen přívod na teplotě 80 °C a dolní na 20 °C. Po skončení simulace byl na výstupu změřen pokles i nárůst teploty cca o 17 °C, což značí, že u modelu proběhl požadovaný přestup tepla (geometrie č. 9). Z toho usuzuji, že takto zkonstruovaný výměník byl mohl najít uplatnění v praxi.

LITERATURA

[1]

BANHART, J. *Metal Foams - from Fundamental Research to Applications* [online]. Department of Materials Science, Technical University Berlin, Berlin, GERMANY, 2007 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b097_banhart2007.pdf

[2]

BANHART, J. *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams* [online]. 3. Fraunhofer-Institute for Manufacturing and Advanced Materials, Wiener Strasse 12, 28359 Bremen, Germany, 2000, s. 74 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://cv3.sim.ucm.es/access/content/group/curriculo-3313-1/grupos/espumas/Foams1.pdf>

[3]

BANHART, J. a BAUMGÄRTNER, F. *Al - foaming* [online]. 2002, s. 22 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/manuscripts/b054_53_banhart2002.pdf

[4]

VEALE, P. J. *Open cell metal foam and Closed cell metal foam. In: ResearchGate* [online]. 2010 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/a-Open-cell-metal-foam-b-Closed-cell-metal-foam-Patrick-J-Veale-2-2010_fig1_264004686

[5]

CURRAN, D. *Aluminium Foam Production using Calcium Carbonate as a Foaming Agent* [online]. Cambridge, 2003 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://core.ac.uk/display/35279581?source=2&algorithmId=13&similarToDoc=https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/252945&similarToDocKey=URL&recSetID=46cac2e8-5803-4b91-bbf5-c360d459bc94&position=1&recommendation_type=same_repo&otherRecs=35279581,35278602,42340210,1320852,1301543. Disertační práce. University of Cambridge.

[6]

DUARTE, I. a OLIVEIRA, M. *Aluminium Alloy Foams: Production and Properties*. KONDOH, Katsuyoshi. Powder Metallurgy [online]. 1. Rijeka, 2012, s. 27 [cit. 2018-04-20]. ISBN 978-953-51-0071-3. Dostupné z: http://cdn.intechopen.com/pdfs/28437/InTech-Aluminium_alloy_foams_production_and_properties.pdf

[7]

ZYRYANOVÁ, I. *Lité kovové pěny z Al slitin*. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava, 2011 [cit. 2018-04-20].

[8]

DOBŘANSKÝ, J. *Optimalizace výroby litých kovových pěn s pravidelnou buňkovou strukturou* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2018-04-20]. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce doc. Ing. Vlasta Bednářová CSc.

[9]

BAMHART, J. *Aluminium foams for lighter vehicles*. Int. J. Vehicle Design, [online]. Berlin, 2005, (37), 12 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/article/a082_banhart2005.pdf

[10]

ROMÁNEK, T. *Výroba a vlastnosti litých kovových pěn s pravidelnou strukturou* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2018-04-20]. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Lichý Ph.D.

[11]

HUCÁKOVÁ, M. *Výnimočné vlastnosti hliníkovej peny*. In: Veda na dosah [online]. Bratislava, 2017, 2017-04-17 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://vedanadosah.cvtisr.sk/vynimocne-vlastnosti-hlinikovej-peny>

[12]

KŘIVÁNEK, R. *Vlastnosti a použití kovových pěn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2018-04-20]. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.

[13]

KROUPOVÁ, I. *Vlastnosti a použití litých kovových pěn*. Ostrava, 2013. [cit. 2018-04-20]. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Lichý Ph.D.

[14]

SLAVÍČEK, J. *Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2018-04-20]. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.

[15]

LICHÝ, P. a ELBEL, T. *Speciální metody výroby odlitků* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/618/618-Lichy-Specialni_metody.pdf

[16]

PARK, C. *Porous and cellular materials for structural applications*. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, WadleyHNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 315.

[17]

MÜLLER, P. *Vliv technologie výrovy litých kovových pěn na jejich užité vlastnosti*. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava, 2016 [cit. 2018-04-20]. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Lichý Ph.D.

[18]

LEFEBVRE, L. P., BANHART, J., DUNAND, D. *Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments*. Advanced engineering materials. 2008, Vol. 10, No. 9, pp. 775-787.

[19]

DUKHAN, N. *Metal foams: Fundamentals and Applications*, Lancaster: DEStech Publications, 2013, 423 s., ISBN 978-1-60595-014-3.

[20]

NGUYENHOANG, V. *The Lost Foam Casting Process* [online]. [cit. 2018-04-04]. <https://www.slideshare.net/viet4777/lost-foam-cast-process>

[21]

GAWRONOVÁ, M. *Lité kovové pěny s pravidelnou buňkovou strukturou*. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava, 2013 [cit. 2018-04-20]. Vedoucí práce doc. Ing. Vlasta Bednářová CSc.

[22]

FRICK, L. *Additive manufacturing comes to metal foam* [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/materials/additive-manufacturing-comes-metal-foam>

[23]

GAILLARD, Y a DAIRON, J. *Casting parts with metallic foam* [Online]. In: MetFoam 2009: 6th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams. 2009. Casting parts with metallic foam. <https://hal.archives-ouvertes.fr>. [cit. 2018-04-04]. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/525447/filename/MetFoam_-_techniques.pdf>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Otevřená buněčná struktura – vlevo / uzavřená buněčná struktura – vpravo [4]	13
Obr. 2 Rozsah aplikací kovových pěn [9]	15
Obr. 3 Kabina vlaku vyrobená za využití kovové pěny [7]	16
Obr. 4 Výztuha sloupku karosérie automobilu z pěny [11]	17
Obr. 5 Tlumiče hluku z hliníkové pěny [7]	17
Obr. 6 Prototypy tlumičů nárazu z hliníkové pěny od společnosti Cymat [9]	18
Obr. 7 Přehled možností pro výrobu kovových pěn [2]	19
Obr. 8 Schéma výroby metodou SAF [2]	20
Obr. 9 Výrobní schéma metody Metcomb [12]	21
Obr. 10 Přímé pění zpěňovadlem se zvýšenou viskozitou [5]	22
Obr. 11 Struktura pěny Alporas se zvýšenou viskozitou [14]	22
Obr. 12 Postupové schéma metody lití na odpařitelný model [5]	24
Obr. 13 - Ukázka odlitku z pěny Duocel vyrobeného na Achenské univerzitě [2]	24
Obr. 14 Princip postupu kovu v „plné formě“ tvořené suchým křemenným pískem [15]	25
Obr. 15 Zařízení pro výrobu modelů z polystyrenu [15]	26
Obr. 16 Ukázky nanášení ochranného nátěru a sušení modelu [20]	26
Obr. 17 Schéma výrobního procesu technologie Lost Foam [8]	27
Obr. 18 Odlitek bloku motoru (vlevo) a jeho model (vpravo) [17]	28
Obr. 19 Schéma výroby kovové pěny z ABS plastu [10]	29
Obr. 20 - Ukázky třech základních typů mřížkové struktury [21]	29
Obr. 21 Schéma výroby kovových pěn litím do preformy [22]	30
Obr. 22 - Postup výroby syntaktických pěn [2]	31
Obr. 23 Preforma vyrobená z navrstvených buněk [23]	32
Obr. 24 Hliníková pěna od firmy Goodfellow Corp. s pravidelnou strukturou [22]	32
Obr. 25 Formovací nářadí	35
Obr. 26 Hotová forma připravená k odlévání – vlevo / horní a spodní zaformovaný rám z JBS – vpravo	36
Obr. 27 Varianty uložení preforem do dutiny formy	37
Obr. 28 Výkres modelu	38
Obr. 29 Ukázka preformy	39
Obr. 30 Vsázkový materiál AlSi10	39
Obr. 31 Elektrická odporová pec LAC	40

Obr. 32 Očištěný odlitek před odřezáním vtokové soustavy.....	41
Obr. 33 Ukázky odlitků s plnou stěnou po obrobení	42
Obr. 34 Ukázky odlitků s dutou stěnou po obrobení	42
Obr. 35 Preforma čtvercového tvaru.....	44
Obr. 36 Vlevo preforma šestiúhelníkového tvaru a vpravo ve tvaru kvádru.....	44
Obr. 37 Ukázka všech tří tvarových variant se dvěma preformami na sobě s mezerou.....	45
Obr. 38 Ukázky dalších simulovaných kombinací preforem	46
Obr. 39 Zelené čáry značí místo pro ohraničení	47
Obr. 40 Zvýrazněna část již sjednocená operací Boolean.....	47
Obr. 41 Ukázka funkce Named selection.....	48
Obr. 42 Ukázky vysíťování jednotlivých částí	48
Obr. 43 Ukázka tepelného proudění modelu geometrie č. 3	50
Obr. 44 Ukázky přestupu tepla u modelu s geometrií č. 6	51
Obr. 45 Ukázka proudění tepla na celém modelu a na bočních stěnách preforem	51
Obr. 46 Graf tepelné závislosti modelu.....	52
Obr. 47 Pohled z perspektivy na prostup tepla v preformách a vtocích.....	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Teploty lití jednotlivých vzorků odlitků	42
Tabulka 2 Zkoumané geometrie	43
Tabulka 3 Vstupní a výstupní parametry	49